

**TUGAS AKHIR - TE 14 1599**

**ANALISIS MEDAN MAGNETIK DI SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN  
FINITE ELEMENT METHOD**

**Roy Fachri Irawan  
NRP 2211 100 188**

**Dosen Pembimbing**

**Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**

**Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**Fakultas Teknologi Elektro**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Surabaya 2016**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

## **Analisis Medan Magnetik di Saluran Transmisi Menggunakan Finite Element Method**

Roy Fachri Irawan  
NRP 2211100188

Dosen Pembimbing  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

## **Analysis of Magnetic Field on Transmission Line Using Finite Element Method**

**Roy Fachri Irawan**  
**NRP 2211100188**

**Advisor**  
**Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT**  
**Faculty of Electrical Technology**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2016**

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “ANALISIS MEDAN MAGNETIK DI SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD” adalah benar-benar hasil karya mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2016

Roy Fachri Irawan  
NRP 2211 100 188

# **ANALISIS MEDAN MAGNETIK DI SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD**

## **TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**NIP. 1970071219980211001**

**Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.**  
**NIP. 195512071980031004**



# **ANALISIS MEDAN MAGNETIK DI SALURAN TRANSMISI MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD**

**Nama : Roy Fachri Irawan**  
**Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.**

## **ABSTRAK**

Pada sistem tenaga listrik, cara untuk menyalurkan listrik dari pembangkit sampai ke konsumen biasanya dikenal dengan sistem transmisi dan distribusi. Saluran transmisi adalah suatu sistem untuk mengirimkan energi listrik dari satu tempat ke tempat lain untuk jarak jauh dan dalam tegangan ekstra tinggi. Akibat dari tegangan yang tinggi dan arus yang mengalir pada saluran transmisi dapat menimbulkan medan listrik dan medan magnet. Medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi pada level tertentu dapat membahayakan lingkungan sekitar, sehingga perlu dilakukan analisa lebih lanjut. Oleh sebab itu akan dilakukan analisa pada *tower* untuk menganalisis distribusi medan magnet pada *tower* transmisi tersebut. Untuk menganalisis distribusi medan magnet pada saluran transmisi maka di gunakan perangkat lunak berbasis FEM (*Finite Element Methode*). Ide dasar dari FEM adalah membagi struktur, badan (*body*), atau daerah yang dianalisis menjadi jumlah yang sangat besar dari suatu elemen hingga (*finite element*). Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini akan dilakukan simulasi pada saluran transmisi 500kV untuk mendapatkan medan magnet yang di hasilkan. Setelah mendapatkan hasil dari simulasi, maka hasil tersebut akan dibandingkan dengan hasil pengukuran manual dengan menggunakan alat pengukur medan magnet HI-3604 *survey meter*.

**Kata Kunci : Saluran Transmisi, Kuat Medan Magnet**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD ON TRANSMISSION LINE USING FINITE ELEMENT METHOD**

**Name : Roy Fachri Irawan**  
**1<sup>st</sup> Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**  
**2<sup>nd</sup> Advisor : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.**

## **ABSTRACT**

On electrical power system, method on transmitting electricity from power plant to consumer is known as transmission and distribution system. Transmission line is a system for transmitting electrical energy from one place to another for a long distance in high voltage. High voltage and current flow in transmission line can cause electrical and magnetic field. Magnetic field that produced by transmission line on certain level can endangering the environment, so further analysis is needed. Therefore an analysis for magnetic field on transmission tower will be done. To analyze magnetic field distribution on transmission line, FEM based software is used. The main idea of FEM is to discretize the body or element on a huge amount of finite element. Therefore, in this final project we will simulate on 500 kV transmission line to obtain the magnetic field. Soon as we get the output of the simulation, there will be a comparison between a survey using HI-3604 survey meter.

**Key Words : Transmission Line, Magnetic Field**



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Analisis Medan Magnetik di Saluran Transmisi Menggunakan Finite Element Method”** ini dengan tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Bapak Irawan dan Ibu Siti Musrifah serta Ica, Aurel, Salsa dan Jeihan yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Soedibjo, sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan perhatiannya dalam tugas akhir.
4. Arief Budi, Grignion Kevin, Yosua Pandapotan dan Quantum yang telah memberikan inspirasi bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Segenap keluarga besar Nuansa, yang selalu mengingatkan dan memberi motivasi kepada penulis.
6. Teman-teman Angkatan 2011 yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
7. Teman-teman WP-Thok yang telah mendukung penulis agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat sebutkan satu persatu yang telah membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Desember 2016

**Penulis**

# DAFTAR ISI

|   | Halaman |
|---|---------|
| HALAMAN JUDUL   |         |
| PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR                                 |         |
| HALAMAN PENGESAHAN  |         |
| ABSTRAK .....   | i       |
| ABSTRACT .....  | iii     |
| KATA PENGANTAR .....  | v       |
| DAFTAR ISI .....  | vii     |
| DAFTAR GAMBAR .....   | ix      |
| DAFTAR TABEL.....   | xi      |
| <br>BAB 1 PENDAHULUAN .....                                     | <br>1   |
| 1.1. Latar Belakang .....                                       | 1       |
| 1.2. Sistematika Penulisan.....                                 | 2       |
| <br>BAB 2 SALURAN TRANSMISI .....                               | <br>3   |
| 2.1. Saluran Transmisi.....                                     | 3       |
| 2.2. Kategori Saluran Transmisi .....                           | 3       |
| 2.2.1. Kategori Panjang Saluran Transmisi .....                 | 3       |
| 2.2.2. Kategori Tegangan Saluran Transmisi .....                | 4       |
| 2.2.3. Kategori Pemasangan Saluran Transmisi .....              | 6       |
| 2.3. Komponen Saluran Transmisi .....                           | 6       |
| 2.4. Tower Transmisi .....                                      | 7       |
| 2.4.1. Jenis-Jenis Tower Transmisi .....                        | 7       |
| 2.4.2. Konstruksi Tower Transmisi .....                         | 11      |
| 2.5. Isolator.....  | 12      |
| 2.5.1. Karakteristik Isolator .....                             | 13      |
| 2.5.2. Klasifikasi Isolator .....                               | 13      |
| 2.5.3. Jenis-Jenis Bahan Isolator .....                         | 14      |
| 2.6. Konduktor .....  | 16      |
| 2.6.1. Bahan Konduktor .....                                    | 17      |
| 2.7. Standar Medan Magnet .....                                 | 17      |
| <br>BAB 3 METODE DAN SIMULASI SALURAN TRANSMISI .....           | <br>21  |
| 3.1. Metode Elemen Hingga ( <i>Finite Element Method</i> )..... | 21      |
| 3.1.1. Proses Diskritisasi .....                                | 22      |

|  |    |
|--|----|
| 3.2. Perhitungan Medan Magnet Pada Saluran Listrik .....             | 22 |
| 3.3. Perhitungan Medan Magnet dengan Metode Elemen<br>Hingga .....   | 23 |
| 3.4. Perhitungan Elemen Segitiga Dua Dimensi Linier .....            | 24 |
| 3.5. Metode Pengukuran .....   | 29 |
| 3.6. Kontruksi dan Spesifikasi Saluran Transmisi .....               | 30 |
| 3.7. Material Penyusun Tower Transmisi dan Isolator<br>Polimer ..... | 32 |
| 3.8. Pemodelan Saluran Transmisi .....                               | 33 |
| 3.8.1. Pemodelan Tower .....   | 33 |
| 3.8.2. Pemodelan Isolator.....                                       | 36 |
| 3.8.3. Pemodelan Pemasangan Saluran Transmisi .....                  | 37 |
| <br>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA DATA.....                       | 41 |
| 4.1. Tegangan Kerja Saluran Transmisi.....                           | 41 |
| 4.2. Arah Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi .....         | 43 |
| 4.3. Grafik dan Kurva R, S, dan T .....                              | 44 |
| 4.3.1 Grafik dan Kurva R.....  | 45 |
| 4.3.2 Grafik dan Kurva S .....                                       | 46 |
| 4.3.3 Grafik dan Kurva T .....                                       | 47 |
| 4.3.4 Perbandingan Grafik R, S, dan T .....                          | 48 |
| 4.3.4 Grafik dan Kurva Tower .....                                   | 49 |
| 4.4. Grafik dan Kurva Andongan Saluran Transmisi .....               | 50 |
| 4.5. Grafik dan Kurva Bawah Andongan .....                           | 51 |
| 4.6. Pengukuran Langsung Medan Magnet .....                          | 52 |
| 4.7. Perbandingan Pengukuran Langsung dengan Simulasi .....          | 54 |
| <br>BAB 5 PENUTUP  |    |
| 5.1 Kesimpulan .....   | 57 |
| 5.2 Saran .....  | 57 |
| <br>DAFTAR PUSTAKA .....   | 59 |
| RIWAYAT HIDUP .....  | 61 |

## DAFTAR GAMBAR

|                    | Halaman   |
|--------------------|---|
| <b>Gambar 2.1</b>  | Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)..... 3   |
| <b>Gambar 2.2</b>  | Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) ..... 3  |
| <b>Gambar 2.3</b>  | Lattice Tower ..... 8   |
| <b>Gambar 2.4</b>  | Tubular Steel Pole ..... 8  |
| <b>Gambar 2.5</b>  | (a) Isolator Long Rod, (b) Isolator Pos, (c) Isolator Piring ..... 14                       |
| <b>Gambar 2.6</b>  | (1) Bahan Porselin, (2) Bahan Gelas, (3) Bahan Polimer ..... 16                             |
| <b>Gambar 3.1</b>  | Contoh Node, Edge, dan Mesh ..... 22  |
| <b>Gambar 3.2</b>  | Domain Perhitungan untuk Masalah Dua Dimensi ..... 27                                       |
| <b>Gambar 3.3</b>  | Konstruksi Steel Lattice Tower 500 kV ..... 30  |
| <b>Gambar 3.4</b>  | Konstruksi Isolator Pos 500 kV ..... 31   |
| <b>Gambar 3.5</b>  | Pemodelan Badan Tower Transmisi ..... 34  |
| <b>Gambar 3.6</b>  | Pemodelan Lengan Tower Transmisi ..... 34   |
| <b>Gambar 3.7</b>  | Hasil Pemodelan Tower Transmisi ..... 35  |
| <b>Gambar 3.8</b>  | (a) Pemodelan Batang Konduktor Didalam Isolator, (b) Pemodelan Isolator ..... 36            |
| <b>Gambar 3.9</b>  | Pemodelan Isolator Dengan Suspensi ..... 37   |
| <b>Gambar 3.10</b> | Pemodelan Tower Dengan Isolator ..... 38  |
| <b>Gambar 3.11</b> | Pemodelan Dua Tower Transmisi ..... 39  |
| <b>Gambar 3.12</b> | Pemodelan Saluran Transmisi ..... 39  |
| <b>Gambar 4.1</b>  | Tegangan Kerja Saluran Transmisi ..... 41   |
| <b>Gambar 4.2</b>  | Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi, (a) Tampak Depan, (b) Tampak Samping ..... 42 |
| <b>Gambar 4.3</b>  | Arah Persebaran Medan Magnet Pada Saluran Transmisi ..... 43                                |
| <b>Gambar 4.4</b>  | Garis Kurva R, S, T, dan Tower ..... 44   |
| <b>Gambar 4.5</b>  | Grafik dan Garis Kurva R ..... 45   |
| <b>Gambar 4.6</b>  | Grafik dan Garis Kurva S ..... 46   |
| <b>Gambar 4.7</b>  | Grafik dan Garis Kurva T ..... 47   |
| <b>Gambar 4.8</b>  | Grafik Perbandingan R, S, dan T ..... 48  |
| <b>Gambar 4.9</b>  | Grafik dan Garis Kurva Tower ..... 49   |
| <b>Gambar 4.10</b> | Penarikan Garis Kurva Andongan ..... 50   |
| <b>Gambar 4.11</b> | Grafik dan Garis Kurva Andongan ..... 50  |

**Gambar 4.12**    Garis Kurva Bawah Andongan ..... 51

**Gambar 4.13**    Grafik dan Garis Kurva Bawah Andongan ..... 52

**Gambar 4.14**    Grafik Pengukuran Langsung..... 53

**Gambar 4.15**    Grafik dan Garis Kurva Andongan ..... 55

## DAFTAR TABEL

|                  | Halaman  |
|------------------|--|
| <b>Tabel 2.1</b> | Tipe tower 500 kV ..... 10   |
| <b>Tabel 2.2</b> | Tipe tower 150 kV ..... 10   |
| <b>Tabel 2.3</b> | Batas Maksimum Medan Listrik dan Magnet<br>(SNI)..... 18               |
| <b>Tabel 2.4</b> | Batas Maksimum Medan Listrik dan Magnet<br>(WHO)..... 19               |
| <b>Tabel 3.1</b> | Spesifikasi Tower Transmisi ..... 31                                   |
| <b>Tabel 3.2</b> | Spesifikasi Isolator Tipe L4-SN791-13 ..... 32                         |
| <b>Tabel 3.3</b> | Data Sheet Material Penyusun Tower Transmisi<br>dan Konduktor ..... 32 |
| <b>Tabel 3.4</b> | Data Sheet Material Isolator ..... 33                                  |
| <b>Tabel 4.1</b> | Hasil Pengukuran Langsung ..... 53                                     |
| <b>Tabel 4.2</b> | Perbandingan Hasil Pengukuran dengan<br>Simulasi ..... 54              |



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pada suatu Sistem Tenaga Listrik, energi listrik yang dibangkitkan dari pusat pembangkit listrik lalu ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi, saluran transmisi tersebut dapat berupa saluran udara atau saluran bawah tanah, namun pada umumnya berupa saluran udara. Energi listrik yang disalurkan lewat saluran transmisi udara pada umumnya menggunakan kawat telanjang sehingga mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar tersebut dengan benda sekelilingnya, dan untuk menyangga kawat penghantar dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya, kawat-kawat penghantar tersebut dipasang pada suatu konstruksi bangunan yang kokoh, yang biasa disebut menara. Antara menara listrik dan kawat penghantar disekat oleh isolator.

Saluran transmisi krian-gresik 500kV mentransmisikan daya listrik yang sangat tinggi setiap harinya. Arus yang mengalir pada saluran transmisi dapat menimbulkan medan listrik dan medan magnet yang di khawatirkan dapat memberi efek samping yang merugikan bagi lingkungan dan kesehatan manusia.[1]

Tujuan dari dilakukannya studi ini adalah untuk menganalisis dan menghitung jumlah medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi krian-gresik 500 kV dan membandingkan hasil analisis simulasi dengan pengukuran langsung menggunakan alat pengukur medan magnet HI-3604 *survey meter*. Untuk mempermudah analisis dan perhitungan jumlah medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi krian-gresik 500 kV, digunakanlah perangkat lunak CST Studio yang berbasis *Finite Element Method (FEM)*.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method, FEM*) adalah suatu metode numerik dengan tujuan memperoleh pemecahan pendekatan dari suatu persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation, PDE*).[2]

## 1.2 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, Studi ini dibagi menjadi lima bab.

Bab pertama merupakan pendahuluan yang meliputi pembahasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dari penulisan.

Bab kedua membahas tentang landasan teori yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini, yaitu komponen saluran transmisi, jenis-jenis saluran transmisi, penjelasan isolator, penjelasan tower transmisi, dan penjelasan konduktor.

Bab ketiga akan dibahas mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini. Meliputi, metode *Finite Element Method*, pemodelan saluran transmisi, dan perhitungan medan magnet yang di hasilkan oleh saluran transmisi. Serta dilampirkan konstruksi dan spesifikasi serta material penyusun saluran transmisi.

Bab keempat akan memaparkan hasil simulasi dan menganalisis hasil tersebut, sehingga dapat diketahui karakteristik medan magnet pada saluran transmisi. Lalu akan dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran langsung di saluran transmisi krian-gresik 500 kV.

Bab kelima berisi kesimpulan dari hasil simulasi saluran transmisi 500 kV dan saran.

## **BAB II**

### **SALURAN TRANSMISI**

#### **2.1 Saluran Transmisi**

Energi listrik yang dibangkitkan oleh suatu Sistem Tenaga Listrik, dibangkitkan dari pusat pembangkit listrik lalu ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi, saluran transmisi dapat berupa saluran udara (*Overhead Line*) atau saluran bawah tanah (*Underground Line*), pada umumnya saluran transmisi yang sering digunakan adalah saluran udara (*Overhead Line*). Energi listrik yang disalurkan melalui saluran transmisi udara pada umumnya menggunakan kawat telanjang yang mengandalkan udara sebagai media isolasi antara kawat penghantar dengan benda sekelilingnya. Kawat penghantar disangga oleh suatu konstruksi bangunan yaitu menara (*tower*) dengan ketinggian dan jarak yang aman bagi manusia dan lingkungan sekitarnya, Diantara menara (*tower*) listrik dan kawat penghantar disekat oleh isolator.

Transmisi adalah proses penyaluran energi listrik dari satu tempat ke tempat lainnya, yang besaran tegangannya adalah Tegangan Ultra Tinggi (UHV), Tegangan Ekstra Tinggi (EHV), Tegangan Tinggi (HV), Tegangan Menengah (MV), dan Tegangan Rendah (LV).

#### **2.2 Kategori Saluran Transmisi**

Saluran transmisi memiliki beberapa kategori dalam pembagian jenis-jenis saluran transmisi. Kategori saluran transmisi diantaranya adalah jarak dan tegangan.

##### **2.2.1 Kategori Panjang Saluran Transmisi**

Saluran transmisi memiliki rentang panjang yang berbeda-beda. Dari segi panjangnya saluran transmisi tegangan tinggi dapat dikategorikan menjadi 3, yaitu:

1. Saluran transmisi pendek  
Saluran transmisi yang masuk dalam kategori pendek adalah saluran transmisi yang memiliki rentang jarak kurang dari 80 km.

2. Saluran transmisi menengah  
Saluran transmisi yang masuk dalam kategori menengah adalah saluran transmisi yang memiliki rentang jarak antara 80 km dan 240 km.
3. Saluran transmisi panjang  
Saluran transmisi yang masuk dalam kategori panjang adalah saluran transmisi yang memiliki rentang jarak lebih dari 240 km.

### **2.2.2 Kategori Tegangan Saluran Transmisi**

Sebagian besar saluran transmisi merupakan saluran AC 3 fasa bertegangan tinggi, meskipun kadang-kadang saluran AC 1 fasa masih digunakan. Sistem saluran transmisi dibagi menjadi beberapa bagian, berdasarkan kapasitas tegangan yang disalurkan yang terdiri dari:

1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200kV-500kV

Saluran transmisi di Indonesia pada umumnya menggunakan pembangkit dengan kapasitas 500 kV. Tujuan dari penggunaan pembangkit dengan kapasitas 500kV adalah agar drop tegangan yang dihasilkan penampang kawat dapat direduksi secara maksimal, sehingga diperoleh operasional yang efektif dan efisien. Permasalahan mendasar dalam pembangunan SUTET adalah konstruksi tiang (*tower*) yang besar dan tinggi, memerlukan tanah yang luas, memerlukan isolator yang banyak, sehingga memerlukan biaya yang mahal.

2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30kV-150kV

Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) memiliki tegangan operasi antara 30kV sampai 150kV. Pada umumnya konfigurasi jaringan SUTT menggunakan *single circuit* atau *double circuit*, yang dimana 1 sirkuit terdiri dari 3 fasa dengan 3 atau 4 kawat. Pada umumnya hanya 3 kawat yang digunakan dan penghantar netralnya diganti oleh tanah sebagai saluran kembali. Jika kapasitas daya yang disalurkan besar, maka digunakan penghantar yang pada masing-masing fasa terdiri dari dua atau empat kawat (*Double* atau *Quadrupole*) dan berkas konduktor disebut *Bundle Conductor*.



**Gambar 2.1** Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)



**.Gambar 2.2** Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)

### 2.2.3 Kategori Pemasangan Saluran Transmisi

Dengan adanya perbedaan lingkungan untuk mentransmisikan listrik, pemasangan saluran transmisi dapat dibagi menjadi 3 kategori, yaitu:

1. Saluran Udara

Saluran udara (*overhead lines*) mentransmisikan daya listrik melalui konduktor yang digantung pada isolator antar *tower* transmisi. Kelebihan dari saluran transmisi udara adalah lebih mudah perawatan dan lebih murah dari saluran dalam tanah. Saluran udara pada umumnya digunakan untuk transmisi jarak jauh.

2. Saluran Bawah Tanah

Saluran bawah tanah (*underground cable*) mentransmisikan daya listrik melalui konduktor yang dipendam didalam tanah. Pemasangan saluran bawah tanah pada umumnya dipasang didalam kota karena tidak menggunakan lahan yang banyak dan tidak mengganggu keindahan dalam kota.

3. Saluran Bawah Air

Saluran bawah air mentransmisikan daya listrik melalui konduktor yang berada di bawah air. Pemasangan saluran bawah air pada umumnya digunakan untuk mentransmisikan daya antar pulau.

### 2.3 Komponen Saluran Transmisi

Saluran transmisi terdiri dari beberapa komponen penting sebagai konstruksi saluran transmisi, yaitu:

1. Tower Transmisi

*Tower* transmisi merupakan struktur tinggi, biasanya menara baja kisi, digunakan untuk mendukung *overhead power line*. *Tower* transmisi menggunakan AC dan DC di sistem bertegangan tinggi, dan tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran. Tinggi dari *tower* berkisar antara 15-55 meter. Bahan-bahan lain selain baja yang dapat digunakan di *tower* transmisi adalah beton dan kayu.

2. Isolator

Isolasi adalah sifat bahan yang dapat memisahkan secara elektris dua buah atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*),

ataupun percikan api (*sparkover*)[3]. Isolator merupakan pemisah daerah yang bertegangan dengan daerah yang tidak bertegangan.

### 3. Konduktor

Konduktor adalah media untuk tempat mengalirkan arus listrik dari Pembangkit listrik ke Gardu induk atau dari GI ke GI lainnya, yang terentang melewati *tower-tower*. Konduktor yang ada pada *tension tower* ditopang oleh *tension clamp*, sedangkan konduktor yang ada pada *suspension tower* ditopang oleh *suspension clamp*. Dibelakang *clamp-clamp* tersebut dipasang rencengan isolator yang terhubung ke *tower*.

### 4. Andongan

Andongan atau sag adalah bentuk lengkung konduktor yang dikarenakan beratnya konduktor yang membentang di antara tower transmisi dan faktor-faktor lainnya. Konduktor memiliki bentuk lengkung tertentu(*catenary curve*) yang dapat dinyatakan dengan persamaan-persamaan tertentu.

## 2.4 Tower Transmisi

Energi listrik yang dibangkitkan dari pusat pembangkit listrik ditransmisikan ke pusat-pusat pengatur beban melalui suatu saluran transmisi pada umumnya menggunakan kawat telanjang, untuk merentangkan kawat penghantar kawat-kawat penghantar tersebut dipasang pada menara (*tower*).

Suatu menara atau *tower* listrik harus kuat terhadap beban yang bekerja padanya, antara lain yaitu:

- Gaya berat *tower* dan kawat penghantar (gaya tekan).
- Gaya tarik akibat rentangan kawat.
- Gaya angin akibat terpaan angin pada kawat maupun badan *tower*.

### 2.4.1 Jenis-Jenis Tower Transmisi

*Tower* transmisi memiliki banyak bentuk dan bahan yang beragam dan dapat di jelaskan menurut bentuk konstruksinya, fungsinya, susunannya dan tipenya. Menurut bentuk konstruksinya, *tower* transmisi yang umum digunakan, dibagi atas 2 macam yaitu:



### 1. Lattice Tower

*Lattice Tower* adalah konstruksi kerangka *tower* transmisi yang terbuat dari baja atau aluminium. *Tower* jenis ini digunakan untuk jaringan listrik dari semua tegangan, dan merupakan jenis yang paling umum untuk jalur transmisi tegangan tinggi. *Lattice tower* biasanya terbuat dari baja galvanis, tetapi aluminium juga digunakan di *lattice tower* untuk mengurangi berat badan *tower*, seperti di daerah pegunungan di mana struktur dipindahkan dengan menggunakan helikopter. Aluminium juga digunakan didalam lingkungan yang akan merusak baja.

### 2. Tubular Steel Pole

Tiang yang terbuat dari pipa baja pada umumnya dirakit di pabrik. Karena daya tahan dan kemudahan manufaktur dan instalasi, dalam beberapa tahun terakhir banyak *tower* transmisi lebih suka menggunakan baja monopolar atau *tower* beton daripada menggunakan *Lattice steel* untuk *power line* baru dan penggantian *tower* transmisi



**Gambar 2.3** Lattice Tower



**Gambar 2.4** Tubular Steel Pole

Sedangkan menurut fungsinya *tower* transmisi di bagi menjadi 7, yaitu:

1. Dead End Tower

Tiang akhir yang berlokasi di dekat Gardu induk, *tower* ini hampir sepenuhnya menanggung gaya tarik.

2. Section tower

Tiang penyekat antara sejumlah *tower* penyangga dengan sejumlah *tower* penyangga lainnya karena alasan kemudahan saat pembangunan (penarikan kawat), umumnya mempunyai sudut belokan yang kecil.

3. Suspension tower

*Tower* penyangga, *tower* ini hampir sepenuhnya menanggung gaya berat, umumnya tidak mempunyai sudut belokan.

4. Tension tower

*tower* penegang, *tower* ini menanggung gaya tarik yang lebih besar daripada gaya berat, umumnya mempunyai sudut belokan.

5. Transposition tower

*Tower* tension yang digunakan sebagai tempat melakukan perubahan posisi kawat fasa guna memperbaiki impedansi transmisi.

6. Gantry tower

*Tower* berbentuk portal digunakan pada persilangan antara dua Saluran transmisi. Tiang ini dibangun di bawah saluran transmisi yang sudah ada.

7. Combined tower

*Tower* yang digunakan oleh dua buah saluran transmisi yang berbeda tegangan operasinya.

Menurut susunan kawat fasa, *tower* transmisi dikelompokkan atas:

1. Jenis delta, digunakan pada konfigurasi horizontal / mendatar.
2. Jenis piramida, digunakan pada konfigurasi vertikal / tegak.
3. Jenis Zig-zag, yaitu kawat fasa tidak berada pada satu sisi lengan *tower*.

Dilihat dari tipe *tower*, *tower* dibagi atas beberapa tipe seperti ditunjukkan pada tabel 2.1 dan tabel 2.2

**Tabel 2.1** Tipe tower 500 kV

| Tipe Tower     |              | Fungsi        | Sudut     |
|----------------|--------------|---------------|-----------|
| Sirkit Tunggal | Sirkit Ganda |               |           |
| A              | AA           | Suspension    | 0° - 2°   |
| A R            | AA R         | Suspension    | 0° - 5°   |
| B              | BB           | Tension       | 0° - 10°  |
| C              | CC           | Tension       | 10° - 30° |
| D              | DD           | Tension       | 30° - 60° |
| E              | EE           | Tension       | 60° - 90° |
| F              | FF           | Dead End      | 0° - 45°  |
| G              | GG           | Transposition |           |

**Tabel 2.2** Tipe tower 150 Kv

| Tiper Tower | Fungsi          | Sudut     |
|-------------|-----------------|-----------|
| Aa          | Suspension      | 0° - 3°   |
| Bb          | Tension/Section | 3° - 20°  |
| Cc          | Tension         | 20° - 60° |
| Dd          | Tension         | 60° - 90° |
| Ee          | Tension         | > 90°     |
| Ff          | Tension         | > 90°     |
| Gg          | Transposition   |           |

#### 2.4.2 Konstruksi Tower Transmisi

Tower transmisi terdiri dari beberapa komponen-komponen penting yang membentuk tower transmisi. Komponen konstruksi tower transmisi diantaranya:

1. Pondasi, yaitu konstruksi beton bertulang untuk mengikat kaki *tower* (*stub*) dengan bumi.
2. *Stub*, bagian paling bawah dari kaki *tower*, pemasangannya bersamaan dengan pemasangan pondasi. *Stub* menyatu dengan pondasi.
3. *Leg*, kaki *tower* yang terhubung antara *stub* dengan badan *tower*. Pada tanah yang tidak rata perlu dilakukan penambahan atau pengurangan tinggi *leg*, sedangkan badan harus tetap sama tinggi permukaannya.
4. *Common Body*, badan *tower* bagian bawah yang terhubung antara *leg* dengan badan *tower* bagian atas (*super structure*). Kebutuhan tinggi *tower* dapat dilakukan dengan pengaturan tinggi *common body* dengan cara penambahan atau pengurangan.
5. *Super structure*, badan *tower* bagian atas yang terhubung dengan *common body* dan *cross arm* kawat fasa maupun kawat petir.
6. *Cross arm*, bagian *tower* yang berfungsi untuk tempat menggantungkan atau mengaitkan isolator kawat fasa serta *clamp* kawat petir. Pada umumnya *cross arm* berbentuk segitiga kecuali *tower* jenis tension yang mempunyai sudut belokan besar berbentuk segi empat.
7. "*K*" *frame*, bagian *tower* yang terhubung antara *common body* dengan *bridge* maupun *cross arm*. "*K*" *frame* terdiri atas sisi kiri dan kanan yang simetri. "*K*" *frame* tidak dikenal di *tower* jenis pyramid.
8. *Bridge*, penghubung antara *cross arm* kiri dan *cross arm* tengah. Pada tengah-tengah *bridge* terdapat kawat penghantar fasa tengah.
9. Rambu identifikasi *tower* dan penghantar/jalur, berfungsi untuk memberitahukan identitas *tower* seperti: Nomor *tower*, Urutan fasa, Penghantar / Jalur dan Nilai tahanan pentanahan kaki *tower*.
10. *Anti Climbing Device (ACD)*, berfungsi untuk menghalangi orang yang tidak berkepentingan untuk naik ke *tower*. ACD dibuat runcing,

berjarak 10 cm dengan yang lainnya dan dipasang di setiap kaki *tower* dibawah Rambu tanda bahaya.

11. *Step bolt*, baut panjang yang dipasang dari atas ACD ke sepanjang badan *tower* hingga super structure dan arm kawat petir. Berfungsi untuk pijakan petugas sewaktu naik maupun turun dari *tower*.
12. Halaman *tower*, daerah tapak *tower* yang luasnya diukur dari proyeksi keatas tanah galian pondasi. Biasanya antara 3 hingga 8 meter diluar *stub* tergantung pada jenis *tower*.

## 2.5 Isolator

Isolator merupakan pemisah antara dearah yang bertegangan dan yang tidak bertegangan. Isolator dapat memisahkan secara elektrik dua buah atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, lompatan api (*flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*)[4].

Isolator memiliki kemampuan untuk menahan tegangan disebut dengan kekuatan dielektrik. Kekuatan dielektrik dari isolator sangat penting dalam penentuan kualitas isolator. Semakin tinggi kekuatan dielektrik bahan isolasi, semakin baik kualitasnya.

Berdasarkan konstruksi bahannya, bahan isolasi dapat digolongkan menjadi:

1. Penyangga/penggantung (*solid support*) yaitu bahan dari isolator yang berbentuk padat. (Contoh: keramik, polimer, kayu).
2. Bahan pengisi (*filling media*) yaitu bahan isolasi yang berbentuk cair atau gas (Contoh: minyak, bitumen, aneka gas dan udara).
3. Bahan penutup (*covering material*) yaitu bahan isolasi yang terletak pada bagian luar, berupa bahan padat atau cair (Contoh: mika, pennis atau enamel).

Bahan isolasi yang baik adalah bahan yang mempunyai resistansi isolasi tinggi, dan kekuatan dielektrik yang baik sehingga sifat hantarannya dapat diminimalkan.

Isolator mempunyai tiga fungsi utama yaitu:

1. Untuk mengisolasi penghantar dengan tanah dan penghantar dengan penghantar.
2. Sebagai penopang beban mekanis yang timbul dari berat penghantar dan gaya tarik penghantar.
3. Untuk menjaga jarak antar penghantar agar tidak berubah.

### **2.5.1 Karakteristik Isolator**

Pada SUTT dan SUTET, isolator berfungsi untuk mengisolir konduktor fasa dengan *tower/ground*. Sesuai fungsinya, karakteristik isolator yang baik harus memenuhi sifat sebagai berikut :

#### **1. Karakteristik elektrik**

Isolator dirancang sedemikian rupa dengan berbagai pertimbangan agar tegangan tembusnya jauh lebih besar daripada tegangan lewat denyarnya. Adapun yang dimaksud dengan tegangan tembus dari sistem isolasi adalah nilai tegangan yang dapat mengakibatkan bahan dielektrik dapat kehilangan sifat isolasi untuk sementara atau selamanya melalui proses peluahan, sedangkan tegangan lewat denyar adalah tegangan yang dapat mengakibatkan terjadinya *flashover* dipermukaan isolator.

#### **2. Karakteristik mekanis**

Karakteristik mekanis isolator adalah kemampuan sebuah isolator untuk menahan beban mekanis terendah yang dapat mengakibatkan isolator tersebut rusak. Isolator harus mempunyai kemampuan mekanik untuk menanggung beban tarik konduktor penghantar maupun beban berat insulator dan konduktor penghantar.

### **2.5.2 Klasifikasi Isolator**

Berdasarkan bentuk dan fungsinya, isolator yang digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik dapat diklasifikasikan dalam tiga macam, yaitu:

1. Isolator Jenis *Long Rod*
2. Isolator Jenis Pos
3. Isolator Jenis Piring



**Gambar 2.5** Isolator *Long Rod* (a) Isolator Pos (b) isolator Piring (c)

Dari tiga macam isolator diatas, setiap penggunaan isolator ditentukan oleh fungsi, kekuatan dielektrik, dan kekuatan mekanis bahan-bahan isolator yang digunakan

### 2.5.3 Jenis-Jenis Bahan Isolator

Bahan-bahan penyusun sebuah isolator mempengaruhi kekuatan dielektrik dan mekanis isolator tersebut. Secara umum, bahan yang sering digunakan adalah porselin, gelas dan polimer.

#### 1. Isolator Porselin

Isolator porselin terbuat dari bahan campuran tanah porselin, *kwarts*, dan *veld spaat*. Bagian luar dari isolator porselin dilapisi dengan bahan *glazuur* agar tidak berpori-pori. Isolator porselin memiliki sifat *non-conducting* (tidak menghantar) listrik yang tinggi, dan memiliki kekuatan mekanis yang besar. Kekurangannya adalah ukuran isolator porselin tidak dapat diperbesar, hal ini dikarenakan adanya penyusutan bahan pada saat pembuatan. Isolator porselin ini lebih mahal dari jenis-jenis isolator yang lain karena material yang digunakan. Agar keandalan dari isolator ini terjaga, dibuat rongga didalamnya dan diisi dengan bahan besi atau baja tempaan sehingga kekuatan mekanis isolator porselin dapat bertambah.

## 2. Isolator Gelas

Isolator Gelas banyak digunakan di jaringan distribusi sekunder, karena Isolator gelas mudah mengembun yang mengakibatkan kontaminan mudah melekat dipermukaan isolator tersebut. Hal ini mengakibatkan mudahnya terjadi *breakdown* dan arus bocor semakin besar. Isolator ini juga rentan terhadap perubahan temperatur, naikturunnya temperatur secara drastis dapat menyebabkan retaknya permukaan isolator. Keunggulan dari isolator ini adalah lebih ekonomis dari pada isolator porselin dan juga kerusakan pada isolator ini dapat mudah terdeteksi karena warna piringan yang transparan.

## 3. Isolator Polimer

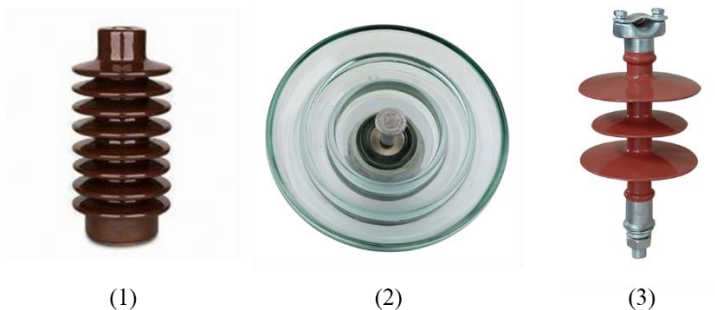
Isolator berbahan polimer ini banyak digunakan sebagai pengganti isolator berbahan porselin dan gelas. Hal ini dikarenakan isolator polimer memiliki beberapa kelebihan, kelebihan isolator polimer antara lain :

1. Memiliki sifat dielektrik dan termal yang lebih tinggi.
2. Memiliki massa jenis yang lebih kecil dibandingkan isolator berbahan porselin dan gelas.
3. Memiliki energi tensi permukaan yang rendah sehingga memiliki sifat hidrofobik, sehingga menghasilkan kemampuan isolasi yang lebih baik dalam kondisi terpolusi dan basah.

Kekurangan dari isolator polimer adalah :

1. Rentan terhadap perubahan cuaca.
2. Bahan penyusun isolator polimer lebih mahal dari pada porselin dan gelas.
3. Kegagalan isolator sulit terdeteksi.





**Gambar 2.6** (1) Bahan Porselin, (2) Bahan Gelas, (3) Bahan Polimer

## 2.6 Konduktor

Konduktor adalah media untuk mengalirkan arus listrik dari pembangkit listrik ke gardu induk atau dari GI ke GI lainnya, yang ditopang *tower-tower* transmisi atau distribusi. Konduktor pada *tension tower* ditopang oleh *tension clamp*, sedangkan pada *suspension tower* ditopang oleh *suspension clamp*. Dibelakang clamp tersebut dipasang rencengan isolator yang terhubung ke *tower*.

Kawat Tanah (*Earth Wire*) adalah media untuk melindungi kawat fasa dari sambaran petir. Kawat ini dipasang di atas kawat fasa dengan sudut perlindungan yang sekecil mungkin, karena dianggap petir menyambar dari atas kawat.

Jarak antar kawat fasa maupun kawat berkas disesuaikan dengan tegangan operasinya, sedangkan penampang dan jumlah konduktor disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan. Kawat yang terlalu kecil dapat menyebabkan panasnya kawat yang berdampak besarnya rugi-rugi transmisi. Pada tegangan yang tinggi penampang kawat, jumlah kawat, dan jarak antar kawat berkas mempengaruhi besarnya corona yang ditengarai dengan bunyi desis atau berisik.

Jarak kawat antar fasa SUTT 70kV idealnya adalah 3 meter, SUTT 6 meter dan SUTET 12 meter. Hal ini digunakan untuk menghindari efek ayunan yang dapat menimbulkan *flashover* antar fasa.

### 2.6.1 Bahan Konduktor

Bahan konduktor yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik harus memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

1. Biaya yang relatif rendah.
2. Konduktivitas yang tinggi.
3. Kekuatan tarik mekanikal yang tinggi.
4. Kuat dan tidak mudah patah.

Konduktor jenis tembaga (*Bare Copper*) merupakan penghantar yang baik karena memiliki konduktivitas yang tinggi dan kekuatan mekanikalnya cukup baik. Karena mahalnya harga tembaga, konduktor jenis tembaga rawan pencurian. Sebagai alternatif lain digunakan konduktor berbahan aluminium karena harganya lebih murah dan lebih ringan namun konduktivitas dan kekuatan mekanikalnya lebih rendah dibanding tembaga.

Pada umumnya SUTT maupun SUTET menggunakan ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*). Bagian dalam dari ACSR berbahan *steel* yang mempunyai kuat mekanik yang tinggi, sedangkan bagian luarnya berbahan aluminium yang memiliki konduktivitas yang tinggi. Karena sifat elektron lebih menyukai bagian luar kawat daripada bagian sebelah dalam kawat maka ACSR cocok dipakai pada SUTT/SUTETI. Untuk daerah yang udaranya mengandung kadar belerang tinggi digunakan konduktor jenis ACSR/AS. ACSR/AS kawat *steel*nya dilapisi dengan aluminium.

### 2.7 Standar Medan Magnet

Standar ini berlaku sebagai pedoman untuk menetapkan ruang batas dan jarak bebas minimum pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET). Standar yang sudah ditentukan oleh badan standarisasi nasional berlaku untuk SUTT dengan tegangan nominal 66 kV dan 150 kV dan juga SUTET dengan tegangan nominal 275 kV dan 500 kV. Standar ini berlaku di Menara dengan material baja maupun beton. Nilai ambang batas maksimum yang diizinkan untuk medan listrik dan medan magnet pada frekuensi 50/60 Hz berdasarkan rekomendasi SNI 04-6950-2003 dapat dilihat pada table berikut:

**Tabel 2.3** Batas maksimum medan listrik dan magnet (SNI)

| Klasifikasi   | Medan Listrik<br>(Kv/M)       | Medan Magnet<br>(mili Tesla)        |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|
| Lingkungan kerja:<br>1. Sepanjang hari kerja<br>2. Waktu Singkat<br>3. Anggota tubuh<br>(tangan dan kaki) | 10<br>30 (s/d 2 jam per hari) | 0,5<br>5 (s/d 2 jam per hari)<br>25 |
| Lingkungan umum:<br>1. Sampai 24 jam per<br>hari<br>2. Beberapa jam per<br>hari                           | 5<br>10                       | 0,1 (ruang terbuka)                 |

Durasi pemaparan untuk kuat medan listrik dengan tegangan antara 10-30 kV/m dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$t \leq \frac{80}{E} \quad (2.1)$$

Keterangan:

$t$  = Lama *exposure* (jam)

$E$  = Kuat medan listrik (kV/m)

Pembatasan ini berlaku di ruang terbuka yang dimana masyarakat umum dapat diperkirakan menghabiskan sebagian besar waktu selama satu hari secara wajar. Contoh tempat diberlakukannya pembatasan ini adalah kawasan rekreasi, lapangan dan lain-lain. Durasi pemaparan medan listrik dan medan magnet maksimum per harinya adalah 2 jam.

Disamping rekomendasi SNI, *World Health Organization (WHO)* juga memberikan standar rekomendasi untuk nilai ambang batas medan listrik sejak tahun 1990. Nilai standar ambang batas yang direkomendasikan oleh *WHO* per 24 jamnya dapat dilihat pada tabel 2.4

**Tabel 2.4** Batas maksimum medan listrik dan magnet (*WHO*)

| Intensitas Medan Listrik<br>(kV/m) | Lama Paparan<br>(menit) |
|------------------------------------|-------------------------|
| 5                                  | Tidak terbatas          |
| 10                                 | 180                     |
| 15                                 | 90                      |
| 20                                 | 10                      |
| 25                                 | 5                       |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB III**

### **METODE DAN SIMULASI SALURAN TRANSMISI**

Didalam bab 3 ini akan membahas metode yang digunakan pada perhitungan distribusi medan magnet disaluran transmisi dan simulasi saluran transmisi menggunakan *software* CST Studio Suite. Metode yang digunakan pada simulasi ini adalah *Finite Element Method* (FEM). FEM merupakan salah satu metode numerik yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur termal dan elektromagnetik.

#### **3.1 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)**

Simulasi distribusi medan magnet pada saluran transmisi menggunakan *software* CST Studio Suite yang memiliki basis Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM). Prinsip dasar dari metode elemen hingga adalah proses diskretisasi. Proses diskretisasi adalah proses pembentukan suatu benda/*body* dengan memisahkannya ke dalam sebuah sistem yang ekuivalen dari bagian terkecil atau elemen yang saling berhubungan antar kumpulan titik (nodal) sehingga menjadi dua atau lebih elemen dengan garis batas dan permukaan. Proses diskretisasi pada elemen hingga ini merupakan proses pembagian pemodelan struktur objek dengan membaginya ke dalam elemen kecil yang jumlahnya tidak terbatas tergantung objek tersebut. Metode perhitungannya adalah menghitung mesh-mesh kecil yang nantinya digabungkan menjadi satu bentuk yang lebih besar untuk digabungkan.[4]

Analisis penyelesaian FEM dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

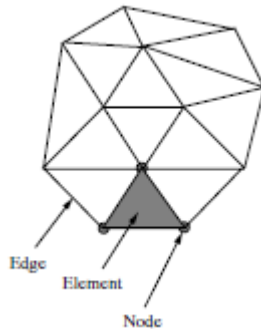
1. Analisis struktur  
Analisis struktur digunakan untuk menganalisis tegangan pada struktur rangka, getaran, *buckling*.
2. Analisis non-struktur.  
Analisis non-struktur digunakan untuk menganalisis kejadian transfer panas, aliran fluida, distribusi dari potensial medan magnet dan medan listrik.

Dalam tugas akhir ini analisis yang digunakan untuk mensimulasikan distribusi medan magnet pada saluran transmisi adalah analisis non-struktur.

### 3.1.1 Proses Diskritisasi

FEM (*Finite Element Method*) adalah sebuah metode numerik yang digunakan untuk melakukan pendekatan perhitungan medan listrik dan magnet pada suatu objek dengan proses diskritisasi.[6]

Proses diskritisasi adalah proses pembagian objek menjadi bagian-bagian kecil yang tidak bertabrakan. Elemen-elemen dibentuk dari beberapa *node*. Jumlah *node* berbeda-beda, tergantung objek yang akan digunakan.



**Gambar 3.1** Contoh *node*, *edge*, dan *mesh*

### 3.2 Perhitungan Medan Magnet pada Saluran Listrik

Medan magnet dapat dihitung menggunakan *Bio-Savart Law* jika arusnya diketahui.

$$\partial H = \frac{1}{4\pi r^2} idl \times u \quad (3.1)$$

Dari persamaan tersebut, *B-field* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$B = \mu_0 H \quad (3.2)$$

Magnitude *B-field* di saluran listrik dibagi menjadi 3 komponen, yaitu komponen X, Y dan Z. Magnitude dari *B-field* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.3)$$

Pada umumnya, gerakan muatan listrik membangkitkan medan magnet di saluran listrik dan medan magnet yang dihasilkan saluran listrik bergantung pada arus yang mengalir dikawat.[1]

### 3.3 Perhitungan Medan Magnet dengan Metode Elemen Hingga

Dalam perhitungan medan magnet, serangkaian informasi yang terdiri dari medan magnet ( $B$ ) dibawa oleh kekuatan medan magnet ( $H$ ) yang dimana  $B = \mu H$ . Dalam *Helmholtz's Equation*, hukum persamaan arus yang dimodelkan oleh medan magnet dapat dihitung jika sumber frekuensi 50 Hz.[6]

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

Dengan mempertimbangkan sistem harmonik waktu yang menyatakan  $H = H e^{j\omega t}$ , maka:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = -\omega^2 \quad (3.5)$$

dan

$$\frac{\partial H}{\partial t} = j\omega H \quad (3.6)$$

Menjadi:

$$\nabla^2 H - j\omega \sigma \mu H + \omega^2 \varepsilon \mu H = 0 \quad (3.7)$$

Keterangan :

$\mu$  = Permeabilitas magnet

$\sigma$  = Konduktivitas

$\varepsilon$  = Konstanta permitivitas dielektrik

$\omega$  = Frekuensi Angular



Dengan mempertimbangkan masalah di 3 dimensi  $(x,y,z)$ , maka:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right) - (j\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2)H = 0 \quad (3.8)$$

### 3.4 Perhitungan Elemen Segitiga Dua Dimensi Linier

Dengan mempertimbangkan energi yang ada pada bidang tiga dimensi yang acak D:

$$\mathfrak{Z} = \int_D \left\{ \left( \int_0^E \mathbf{D} d\mathbf{E} - \int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B} \right) + (\mathbf{J}\mathbf{A} - \rho_v V) \right\} dD \quad (3.9)$$

Keterangan :

**D, E, B, H** = Vektor medan listrik dan magnet

**A** = Vektor magnet potensial

**V** = Potensial listrik skalar

**J** = Vektor massa jenis konduksi arus listrik

Integral dalam kurung yang pertama merupakan perbedaan kerapatan volume dari energi listrik dan magnet. Sedangkan integral pada kurung kedua merupakan perbedaan kerapatan volume dari energi interaksi antara konduksi arus dengan medan magnet. Energi interaksinya sama dengan usaha yang dihasilkan oleh gaya medan untuk membawa kerapatan arus dari tak hingga sampai dengan kondisi yang sudah dikarakterisasi oleh nilai **A** dan **V** yang dimana potensialnya (**A**=0) dan (**V**=0).[6]

Potensial elektromagnetik dari **A** dan **V** menentukan vektor **E** dan **B** dari medan magnetnya.

$$\mathbf{E} = -grad V \quad (3.10)$$

dan

$$\mathbf{B} = rot \mathbf{A} \quad (3.11)$$

Perumusan energi yang berhubungan dengan medan magnet stasioner yang dihasilkan oleh arus searah dapat dinyatakan sebagai:

$$\mathfrak{I}(\mathbf{A}) = \int_{\mathcal{D}} \left( \int_0^{\mathbf{B}} \mathbf{H} d\mathbf{B} - \mathbf{J} \mathbf{A} \right) d\mathcal{D} \quad (3.12)$$

Permasalahan dua dimensi di koordinat *Cartesian* (x,y,z) disebut sebagai *parallel-plane*. Kerapatan arus ( $\mathbf{J}$ ) diorientasikan oleh *axis* Oz dan vektor potensial magnet mempunyai struktur  $\mathbf{A} = A\mathbf{k}$  dimana juga diorientasikan oleh *axis* Oz. Induksi magnetik dapat dirumuskan:

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A(x,y) \end{vmatrix} = \mathbf{i} \frac{\partial A}{\partial y} - \mathbf{j} \frac{\partial A}{\partial x} = \mathbf{k} \times (-\text{grad} A) \quad (3.13)$$

Dan kuadrat dari induksi magnet:

$$\mathbf{B}^2 = (\text{rot} \mathbf{A})^2 = \begin{pmatrix} \frac{\partial A}{\partial y} \\ \frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix} = \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 = (\text{grad} A)^2 \quad (3.14)$$

Vektor potensial magnetik  $\mathbf{A}$  bisa didapatkan dengan meminimalisasi rumus:

$$\delta \mathfrak{I}(\mathbf{A}) = 0 \quad (3.15)$$

Dalam kasus medan magnet stasioner, perumusannya berkaitan dengan ukuran fisik dari permasalahan yang diketahui seperti total energi dari medan magnet didalam domain D:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_{\mathcal{V}} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dv \quad (3.16)$$

Energi magnet yang berada di medan magnet dengan kerapatan volum  $\omega_m$ :

$$\omega_m = \frac{\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}}{2} = \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu} \quad (3.17)$$

Eckhardt mendeskripsikan dengan detail solusi dari permasalahan ini. Kerapatan medan magnet dikurangi menjadi peramaan skalar sebagai berikut:

$$\omega_m = \frac{1}{2\mu} B^2 - J \cdot A = \frac{1}{2\mu} \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] - J \cdot A \quad (3.18)$$

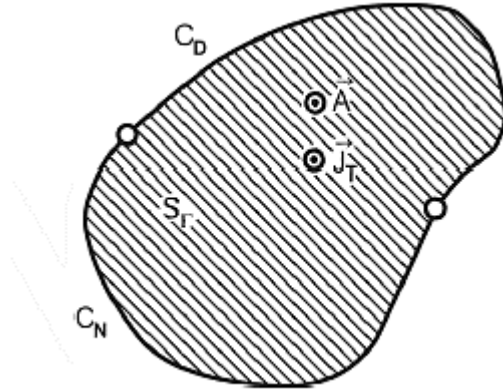
Didalam kasus *parallel-plane fields*, batasannya adalah:

$$A(x, y) = f(P), \quad P \in C_D \quad (3.19)$$

$$-\frac{1}{\mu} \frac{dA}{dn} \Big|_{C_N} = g(P), \quad P \in C_N \quad (3.20)$$

Dimana (3.19) merupakan *Dirichlet boundary conditions* dibatasan  $C_D$  dan (3.20) merupakan *Neumann boundary conditions* dibatasan  $C_N$ . Fungsi yang tidak diketahui ( $A(x, y)$ ) merupakan hasil dari *Poisson Equation* di domain dua dimensi, batasan  $\Gamma$  dibentuk dari dua bagian berbeda yaitu  $C_D$  dan  $C_N$  dimana kondisi *Neumann and Dirichlet* diaplikasikan (Gambar 3.2)

$$\Gamma = C_D \cup C_N \quad (3.21)$$



**Gambar 3.2** Domain perhitungan untuk masalah dua dimensi

$$\ell = \int_s \left\{ \frac{1}{2\mu} \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] - J \cdot A \right\} dx dy \quad (3.22)$$

Dimana fungsi  $\ell$  merepresentasikan energi magnet yang dihitung dipermukaan  $S_r$  dibatasi oleh kurva  $\Gamma$ . Fungsi yang tidak diketahui ( $A(x,y)$ ) untuk *node i* dapat dihitung dengan rumus:

$$\frac{\partial \ell}{\partial A_i} \int_s \left\{ \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial A}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial A_i} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial A}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial A_i} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] - J \frac{\partial A}{\partial y} \right\} dx dy = 0 \quad (3.23)$$

Dengan begitu, didapatkan sistem persamaan:

$$f_k = \sum_{z=1}^{q(i)} \frac{\partial \ell}{\partial A_i} = 0 \quad (3.24)$$

$A_i$  adalah vektor potensial magnet dari *node i* di elemen  $z$ . Differensial yang ada dirumus (3.22) dituliskan berdasarkan *shape functions* dan dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \sum_{k=1}^{n(e)} A_k \frac{\partial a_k}{\partial x} = \sum_{k=1}^{n(e)} A_k \cdot b_k \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial A}{\partial y} = \sum_{k=1}^{n(e)} A_k \frac{\partial a_k}{\partial y} = \sum_{k=1}^{n(e)} A_k \cdot c_k \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial A_i} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) = \frac{\partial a_i}{\partial x} = b_i \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial A_i} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \frac{\partial a_i}{\partial y} = c_i \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial A}{\partial A_i} = \frac{\partial}{\partial A_i} \left( \sum_{k=1}^{n(e)} a_k A_k \right) = a_i = a_i + b_i \cdot x + c_i \cdot y \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial \ell_e}{\partial A_i} = \int_S \left\{ \frac{1}{\mu} [(\sum_{k=1}^{n(e)} b_k \cdot A_k) \cdot b_i + (\sum_{k=1}^{n(e)} c_k \cdot A_k) \cdot c_i] - J a_i \right\} dx dy = 0 \quad (3.30)$$

Dengan mempertimbangkan media homogen, permitivitas magnet  $\mu$  konstan disetiap elemen hingga, dan menjadi independen dari koordinat  $x$  dan  $y$

$$\frac{\partial \ell_e}{\partial A_i} = \frac{D}{2\mu} [A_i(b_1 b_i + c_1 c_i) + A_2(b_2 b_i + c_2 c_i) + A_3(b_3 b_i + c_3 c_i)] - J \frac{D}{6} = 0 \quad (3.31)$$

Dimana  $D$  merupakan determinan yang dihitung:

$$D = 2s_\ell \quad (3.32)$$

Persamaan (3.30) dapat dituliskan dalam bentuk matrix, yaitu:

$$\frac{\partial \ell_e}{\partial A_i} = \frac{D}{2\mu} (b_1 b_i + c_1 c_i \quad b_2 b_i + c_2 c_i \quad b_3 b_i + c_3 c_i) \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} - J \frac{D}{6} = 0 \quad (3.33)$$

Persamaannya merupakan penggabungan elemen hingga selain „ne”. Perumusannya membutuhkan

$$\sum_{e=1}^{ne} \frac{\partial \ell_e}{\partial A_i} = 0 \quad (3.34)$$

Dimana „ne” merupakan jumlah total dari elemen hingga.

$$\{F\} = [K] \cdot \{A\} - [P] + [Q] \quad (3.35)$$

Istilah  $[P]$  digunakan untuk kasus tipe elemen „source” dimana kerapatan arus  $J$  non-null, dan istilah  $[Q]$  digunakan untuk kasus elemen yang ada disalah satu bentuk dari *non-homogeneous Neumann boundary*. Dengan menggabungkan persamaan „ne” (3.33), sebuah sistem linear dari nilai persamaan vektor potensial magnet didalam *node mesh* didapatkan.

### 3.5 Metode Pengukuran

Pengukuran medan magnet secara langsung dapat dilakukan dengan menggunakan alat ukur *ELF Field Strength Measurement System* tipe HI-3604 produksi Holaday Industries Inc. Dan untuk jarak dan ketinggian pengukuran dapat diukur menggunakan meteran rol.

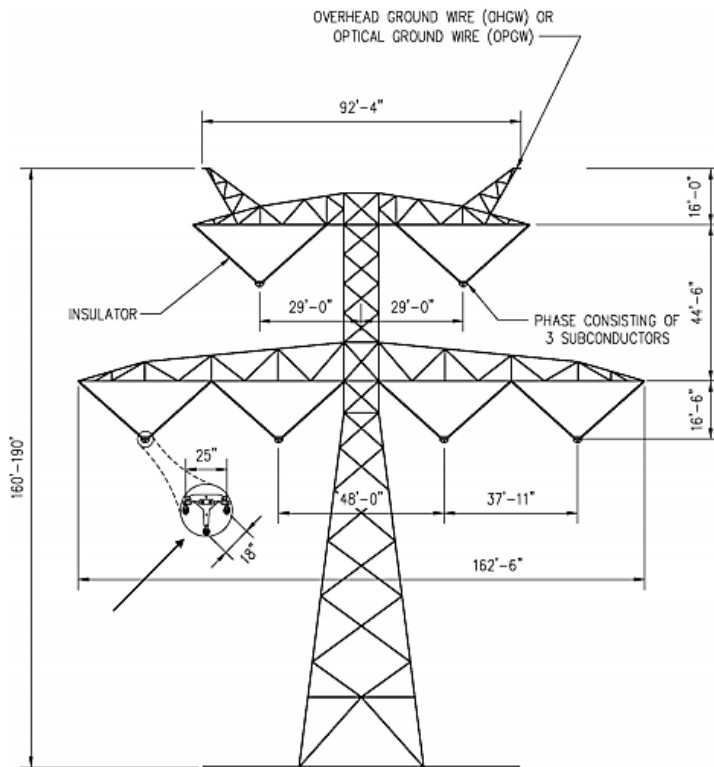
Pengukuran medan magnet dilakukan dititik-titik yang sudah ditentukan. Titik pengukuran yang pertama berada dibawah andongan, titik kedua berada di *tower* transmisi dan titik pengukuran yang terakhir berada di R, S, dan T dari saluran transmisi.

Untuk menentukan koordinatnya, digunakan *Global Positioning System* (GPS). Pengukuran medan magnet secara langsung dilakukan di saluran transmisi 500 kV Krian-Gresik yang berada di Surabaya bagian barat.

### 3.6 Kontruksi dan Spesifikasi Saluran Transmisi

Pada simulasi tugas akhir ini, jenis *tower* transmisi yang digunakan adalah *tower* transmisi *Double-Circuit* dengan rating tegangan nominal 500 kV. Dalam simulasi ini dimodelkan *tower* transmisi dengan jenis lattice, isolator dengan jenis pos dan konduktor dengan material tembaga.

Konstruksi *tower* transmisi yang disimulasikan dapat dilihat pada gambar 3.3, dan spesifikasi *tower* transmisi dapat dilihat pada tabel 3.1.

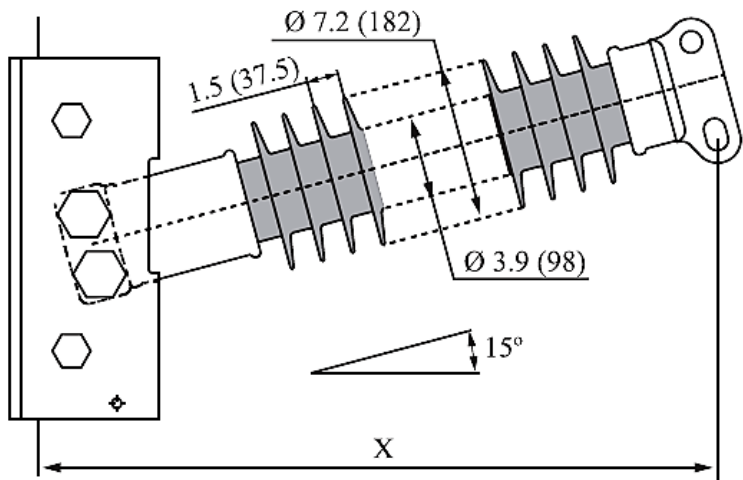


**Gambar 3.3** Konstruksi Steel Lattice Tower 500 kV

**Tabel 3.1** Spesifikasi Tower Transmisi

| Specification  | UNIT |       |
|----------------|------|-------|
| Voltage Class  | kV   | 500   |
| Section Length | Ft   | 162,6 |
|                | m    | 49    |
| Section Height | Ft   | 180   |
|                | m    | 55    |
| Top Arm Length | Ft   | 92    |
|                | m    | 28    |
| Bot Arm Length | Ft   | 162,6 |
|                | m    | 49    |

Konstruksi isolator dengan material polimer yang digunakan dalam pemodelan simulasi dapat dilihat digambar 3.4. Isolator yang digunakan dalam pemodelan adalah isolator produksi NGK-Locke dengan tipe L4-SN791-13. Untuk spesifikasi isolator yang digunakan dapat dilihat ditabel 3.2



Dimensi dalam satuan ukur inci.  
Satuan millimeter ditampilkan di ( )

**Gambar 3.4** Konstruksi isolator pos 500 kV



**Tabel 3.2** Spesifikasi isolator tipe L4-SN791-13

| Specification                  | UNIT                             |             |
|--------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Low Frequency Flashover        | kV                               | 920         |
| Critical Impulse Flashover     | Positive<br>kV<br>Negative<br>kV | 162,6<br>49 |
| Number of Sheds                |                                  | 79          |
| Length “X”                     | mm                               | 3252        |
| Arcing Distance                | mm                               | 3005        |
| Leakage Distance               | mm                               | 8888        |
| Maximum Design Centilever Load | kN                               | 7.9         |
| Weight                         | kg                               | 100.6       |
| Rod Width                      | mm                               | 98          |
| Polymer Plate Width            | mm                               | 182         |
| Distance Between Plates        | mm                               | 37.5        |

### 3.7 Material Penyusun Tower Transmisi dan Isolator Polimer

Tabel berikut menunjukkan material-material yang digunakan oleh *tower* transmisi, dan isolator polimer pada simulasi berdasarkan pada data *library* CST Studio Suite.

**Tabel 3.3** Data sheet material penyusun tower transmisi dan konduktor

| No | Unit         | Material           |                   |
|----|--------------|--------------------|-------------------|
|    |              | Copper (Pure)      | Ferro A6M (lossy) |
| 1  | Epsilon      | 1                  | 5.9               |
| 2  | Mue          | 1                  | 1                 |
| 3  | El. Cond.    | $5.96 \times 10^7$ |                   |
| 5  | Therm. Cond. |                    | 2                 |

**Tabel 3.4** Data sheet material isolator

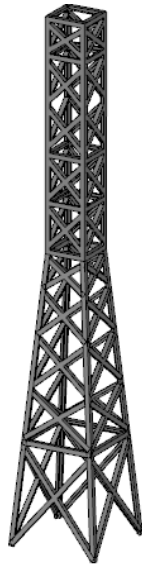
| No | Unit         | Material            |                          |
|----|--------------|---------------------|--------------------------|
|    |              | Epoxy Resin         | Polymide (lossy)         |
| 1  | Epsilon      | 4                   | 3.5                      |
| 2  | Mue          | 1                   | 1                        |
| 3  | El. Cond.    | $1 \times 10^{-15}$ |                          |
| 4  | Rho          | 1500                | 1400                     |
| 5  | Therm. Cond. | 0.2                 | 0.2                      |
| 6  | Heat cap.    |                     | 1                        |
| 7  | Diffusivity  |                     | $1.42857 \times 10^{-7}$ |
| 8  | Young's Mod. | 13                  | 2.5                      |
| 9  | Poiss. Ratio | 0.45                | 0.4                      |
| 10 | Thermal Exp. |                     | 25                       |

### 3.8 Pemodelan Saluran Transmisi

Dengan menggunakan software CST Studio Suite, saluran transmisi dimodelkan dalam bentuk 3 dimensi. Pemodelan dilakukan dengan aplikasi *LF Solver* dalam software CST Studio Suite. Parameter satuan yang digunakan dalam pemodelan adalah meter untuk luas dan volume, dan menggunakan hertz untuk frekuensinya.

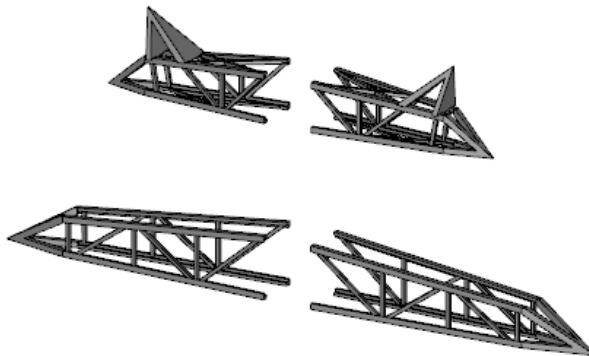
#### 3.8.1 Pemodelan Tower

Pemodelan awal yang dilakukan adalah pemodelan *tower* transmisi. Jenis *tower* yang digunakan dalam pemodelan adalah *lattice tower* dengan material ferro A6M. Pemodelan yang terlebih dahulu dilakukan adalah pemodelan badan *tower* transmisi. Hasil pemodelan badan *tower* transmisi dapat dilihat pada gambar 3.5.



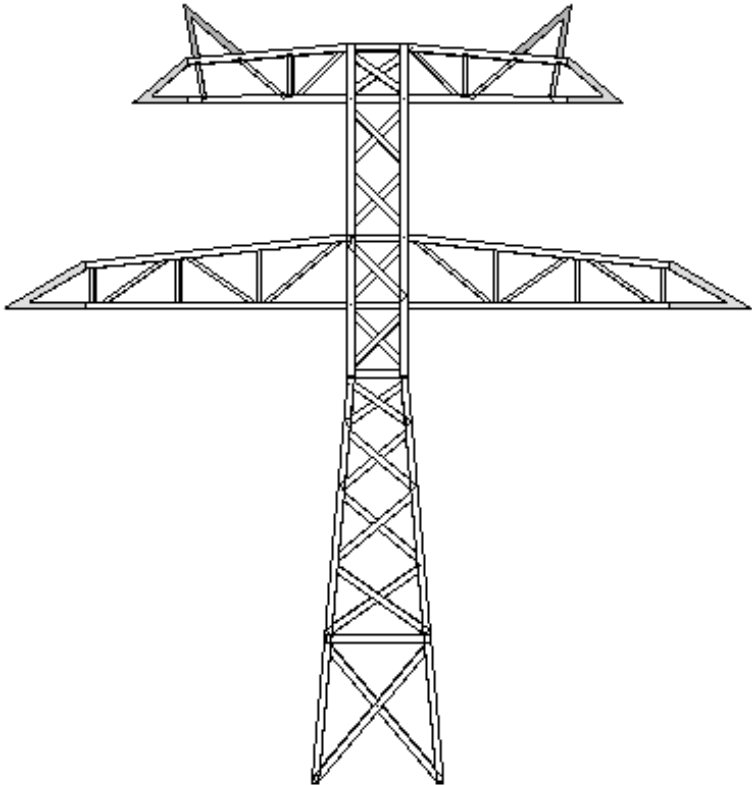
**Gambar 3.5** Pemodelan badan tower transmisi

Setelah pemodelan badan *tower*, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah pemodelan lengan-lengan *tower* transmisi dan *groundwire* yang terletak di bagian atas lengan atas *tower* transmisi. Hasil pemodelan lengan-lengan *tower* transmisi beserta *groundwire* nya dapat dilihat pada gambar 3.6



**Gambar 3.6** Pemodelan lengan *tower* transmisi

Setelah badan *tower* transmisi dan lengan *tower* transmisi dibentuk, selanjutnya dilakukan penyatuan lengan *tower* transmisi dengan badan *tower* transmisi untuk membentuk sebuah *tower* transmisi. Hasil penyatuan dari lengan *tower* transmisi dan badan *tower* transmisi dapat dilihat digambar 3.7

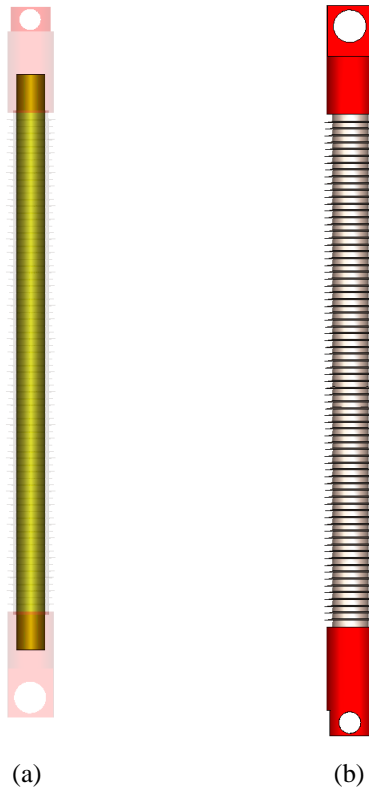


**Gambar 3.7** Hasil pemodelan tower transmisi

### 3.8.2 Pemodelan Isolator

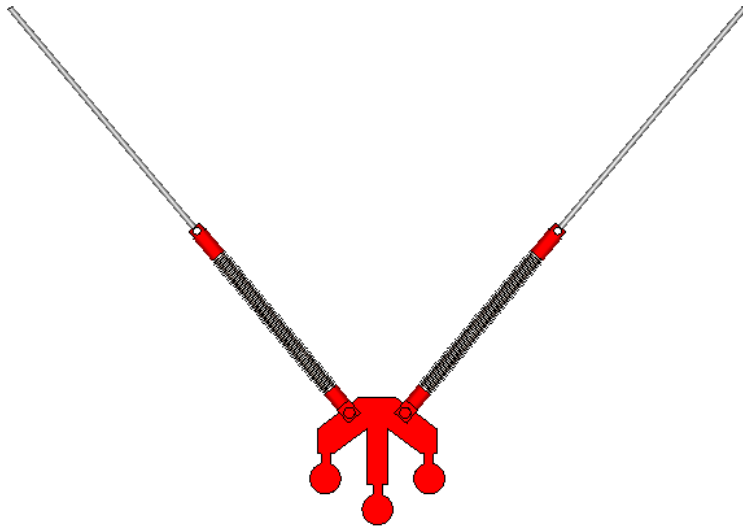
Setelah pemodelan *tower* transmisi, langkah selanjutnya adalah pemodelan isolator 500 kV. Pemodelan batang konduktor menggunakan material *epoxy resin*. Hasil pemodelan batang konduktor dalam isolator dapat dilihat pada gambar 3.8 (a).

Pemodelan selanjutnya adalah memasang sirip-sirip isolator dengan material *polymide* dan memasang *end fitting* dengan material *iron*. Hasil pemodelan isolator dapat dilihat pada gambar 3.8 (b).



**Gambar 3.8** (a) Pemodelan batang konduktor didalam isolator  
(b) Pemodelan isolator

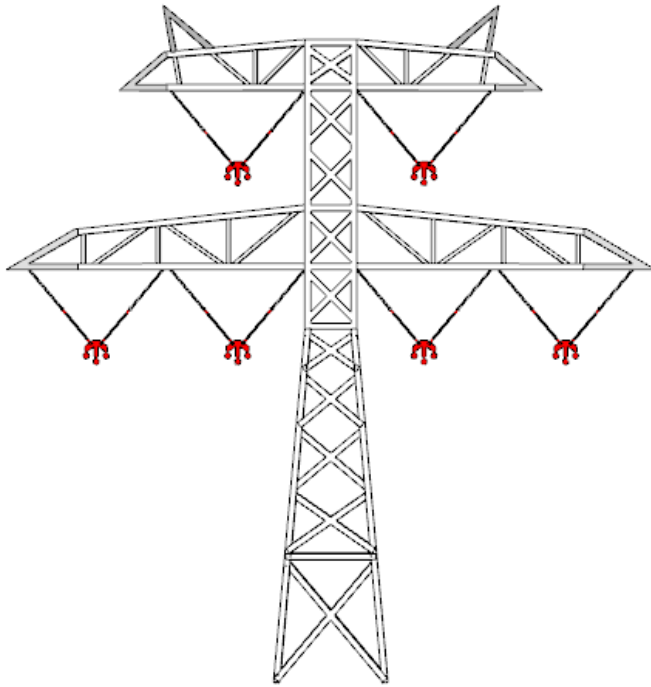
Setelah pemodelan isolator selesai, selanjutnya kita lakukan pemasangan isolator pada suspensi isolator. Suspensi isolator digunakan untuk menghubungkan isolator dengan *tower* transmisi dan digunakan untuk menggantungkan rentangan konduktor saluran transmisi. Setelah pemodelan isolator berhasil dihubungkan dengan suspensi, kita dapatkan hasil dari pemodelan yang dapat dilihat pada gambar 3.9



**Gambar 3.9** Pemodelan isolator dengan suspensi

### **3.8.3 Pemodelan Pemasangan Saluran Transmisi**

Setelah semua komponen-komponen utama pembentuk *tower* transmisi, langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah pemasangan komponen-komponen tersebut. Pertama dilakukan pemasangan isolator yang sudah menyatu dengan suspensi di *tower* transmisi. Hasil pemasangan isolator bersuspensi dengan *tower* transmissi dapat dilihat pada gambar 3.10



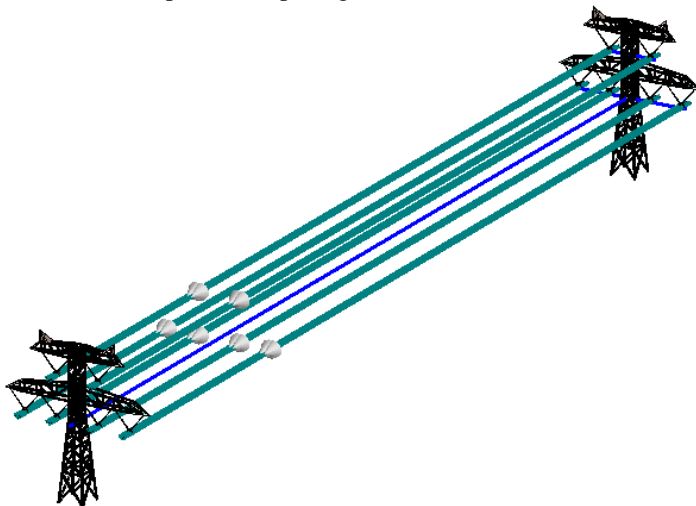
**Gambar 3.10** Pemodelan tower dengan isolator

Langkah selanjutnya yang dilakukan untuk membentuk sebuah saluran transmisi adalah mendirikan *tower* kedua. *Tower* kedua didirikan dengan jarak antar *tower* sepanjang 365 meter. Hasil dari pemodelan dua *tower* dapat dilihat pada gambar 3.11



**Gambar 3.11** Pemodelan dua tower transmisi

Langkah terakhir yang dilakukan adalah memasang konduktor di kedua *tower* transmisi yang sudah didirikan. Hasil akhir pemodelan saluran transmisi dapat dilihat pada gambar 3.12



**Gambar 3.10** Pemodelan saluran transmisi



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

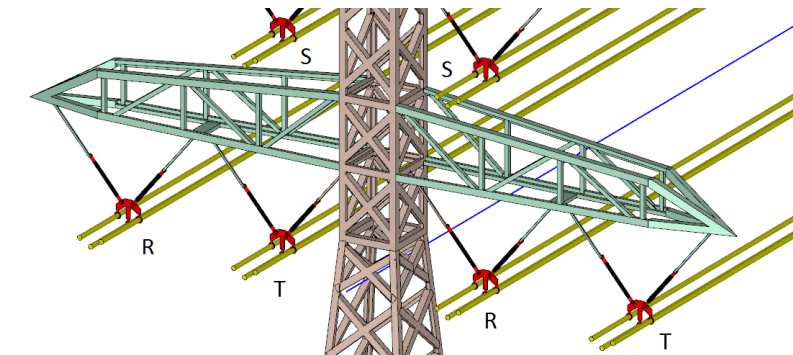
### HASIL SIMULASI DAN ANALISA DATA

Pada bab ini akan dijelaskan hasil simulasi dan analisis hasil simulasi. Hal ini dilakukan dengan tujuan mengetahui perbandingan nilai distribusi medan magnet pada saluran transmisi.

#### 4.1 Tegangan Kerja Saluran Transmisi

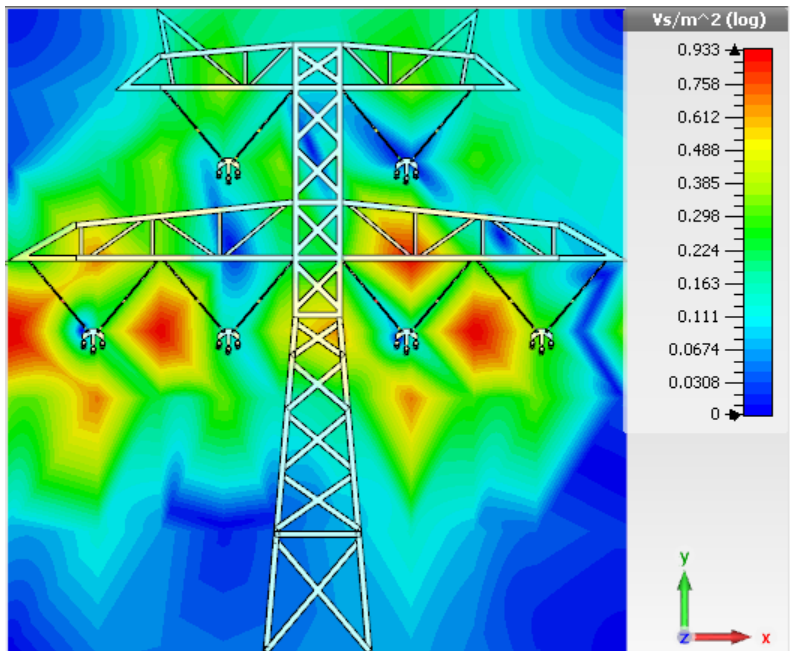
Tegangan yang bekerja pada saluran transmisi sesuai dengan tegangan nominal saluran transmisi, yaitu 500 kV.

Gambar 4.1 menunjukkan tegangan yang diberikan pada saluran transmisi tersebut. Tegangan 500 kV 3 fasa diberikan pada konduktor yang berwarna kuning pada gambar dengan penempatan R, S dan T.

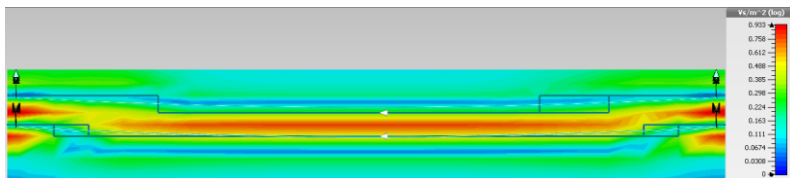


**Gambar 4.1** Tegangan kerja saluran transmisi

Setelah konduktor diberi tegangan, dilakukan simulasi menggunakan *LF Solver* dengan menggunakan frekuensi 50 Hz. Hasil dari simulasi tampak depan dapat dilihat digambar 4.2 dan tampak samping dapat dilihat digambar 4.3.



(a)



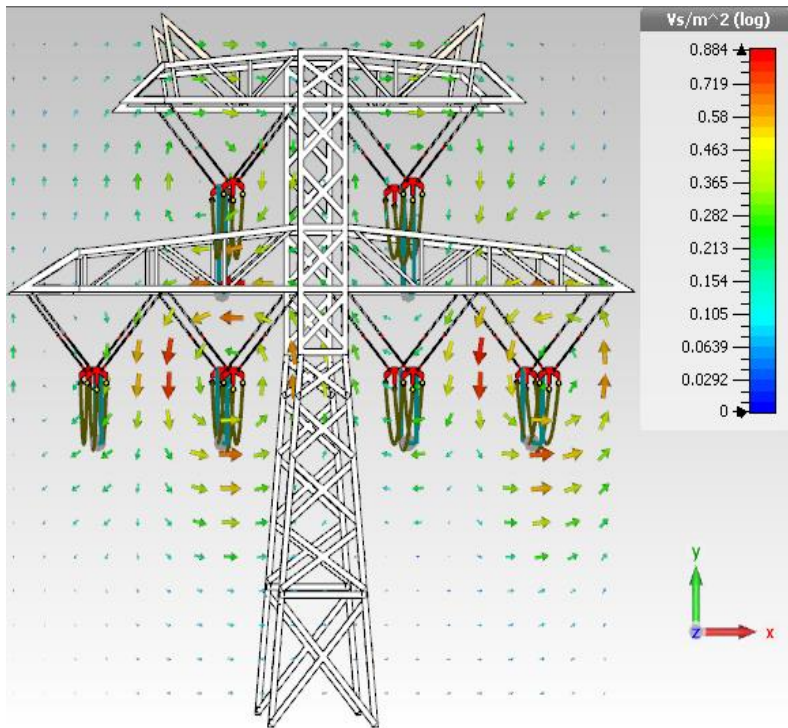
(b)

**Gambar 4.2** Distribusi medan magnet disalurkan transmisi, (a) Tampak depan  
(b) Tampak samping

Pada gambar 4.2, dapat dilihat distribusi medan magnet pada saluran transmisi dengan indikator warna. Warna merah pada gambar menunjukkan nilai medan magnet tertinggi dan warna biru sedikit atau tidak ada nilai medan magnet.

#### 4.2 Arah Distribusi Medan Magnet di Saluran Transmisi

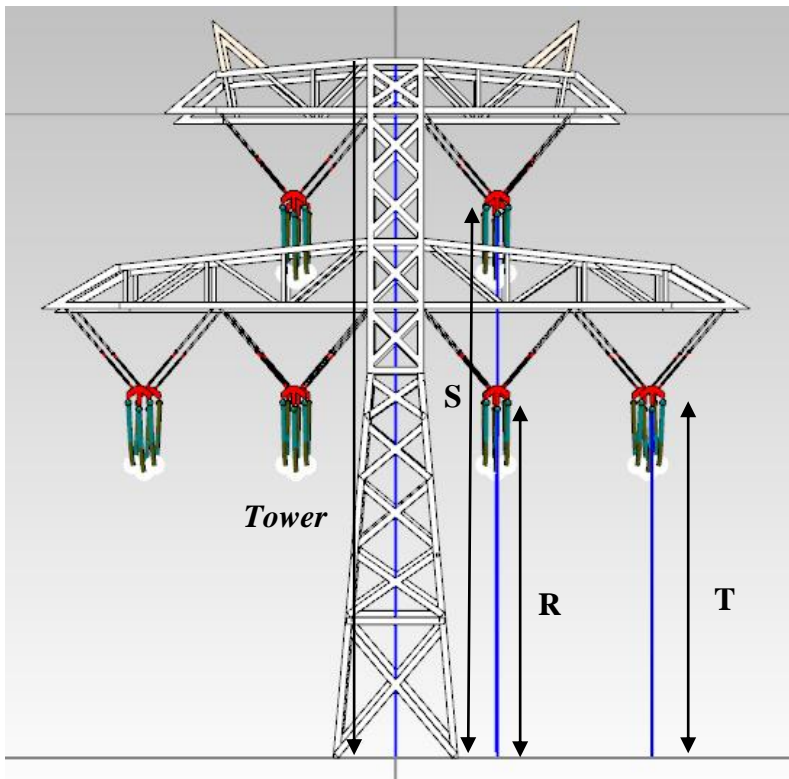
Arah persebaran medan magnet mengalami penyebaran ke segala arah terutama pada bagian konduktor yang diberikan tegangan, badan *tower*, dan juga isolator pos. Besar kecilnya medan dapat dilihat dari warna panah-panah pada gambar 4.4 yang dimana warna merah merupakan medan magnet tertinggi dan biru medan magnet terendah. Nilai medan magnet terbesar  $0,844 \text{ Vs/m}^2$  yang berada disekitar konduktor yang diberi potensial dan nilai terkecil  $0,0767 \text{ Vs/m}^2$  di area yang jauh dari konduktor dan *tower*.



**Gambar 4.3** Arah persebaran medan magnet pada saluran transmisi

#### 4.3 Grafik dan Kurva R, S, T dan Tower

Dalam subbab ini akan dijelaskan paparan medan magnet yang dihasilkan oleh saluran transmisi yang berada dititik R, S, T dan *Tower*. Hasil simulasi berupa grafik dari garis kurva R, S, T dan *Tower*. Penarikan garis kurva yang digunakan di grafik R, S, T dan *Tower* dapat dilihat pada gambar 4.4. dengan tinggi masing-masing kurva R, S, T dan *Tower* secara berurutan adalah 27 m, 43 m, 27 m, dan 54 m.

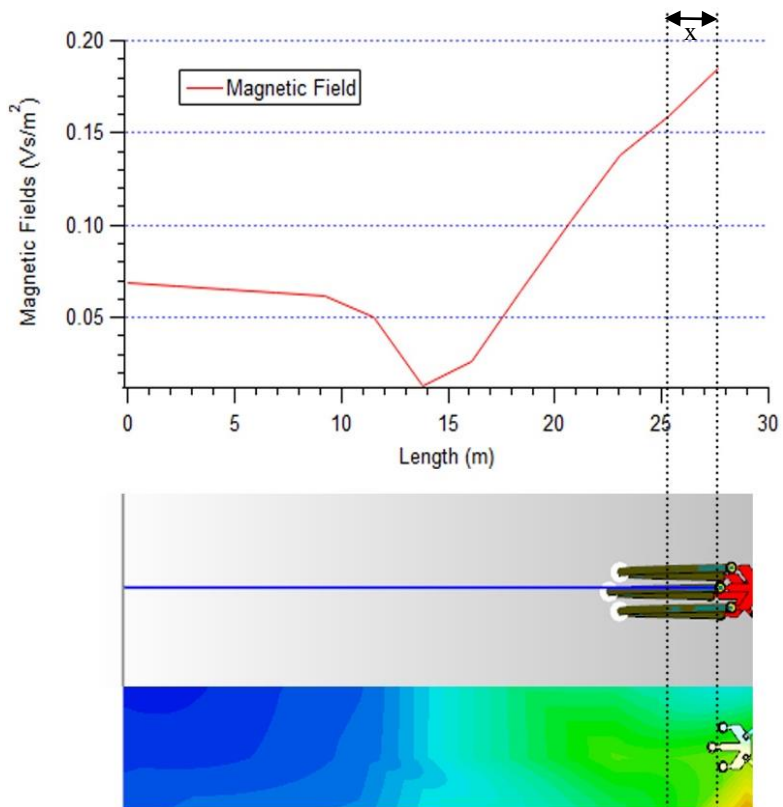


**Gambar 4.4** Garis kurva R, S, T dan Tower

#### 4.3.1 Grafik dan Kurva R

Pada subbab ini akan dilakukan pengamatan serta analisa medan magnet pada bagian saluran transmisi, lebih tepatnya pada R.

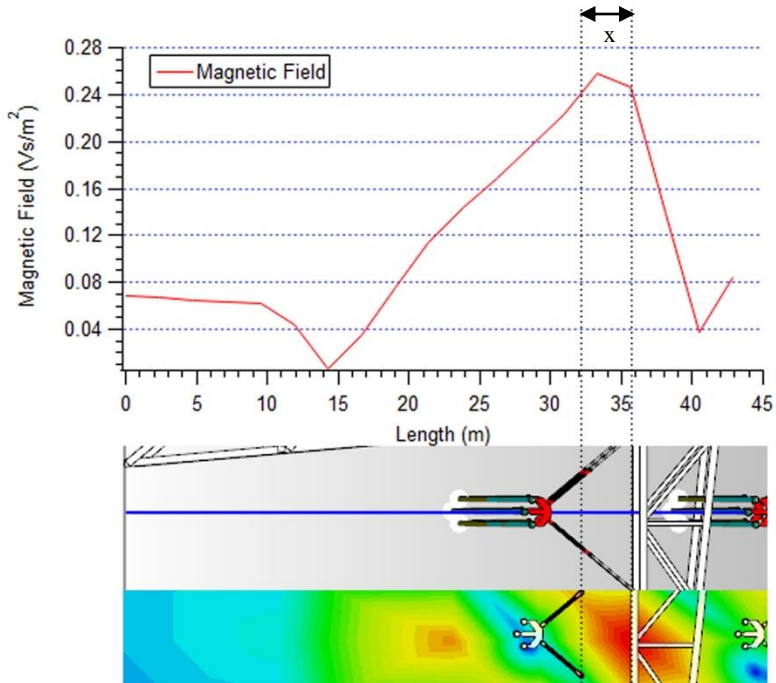
Dapat dilihat digambar 4.5 nilai medan magnet pada saluran transmisi dititik R dengan tinggi kurva 27 m. Garis berwarna biru menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Nilai medan magnet awalnya turun hingga  $0,013 \text{ Vs/m}^2$  lalu nilai medan magnet naik secara konstan hingga titik tertinggi dipuncak kurva (x). Nilai medan magnet tertinggi terdapat di area konduktor dengan nilai  $0,185 \text{ Vs/m}^2$  dan nilai medan magnet tertinggi dan terendahnya secara berurutan ada diketinggian 27 m dan 13 m.



**Gambar 4.5** Grafik dan garis kurva R

### 4.3.2 Grafik dan Kurva S

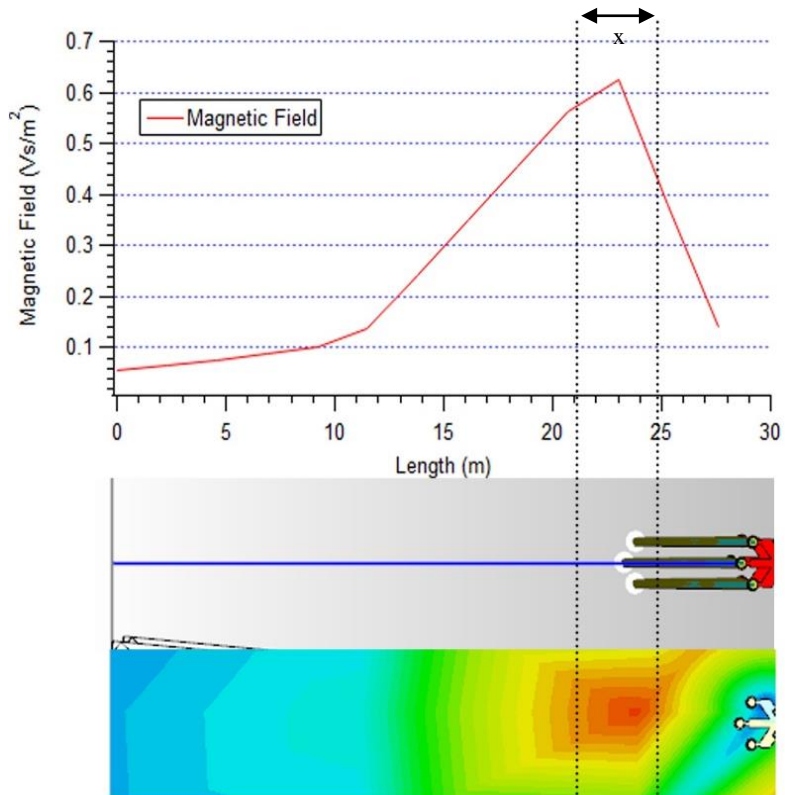
Pada gambar 4.6 dapat dilihat nilai medan magnet pada saluran transmisi yang berada di titik S. Garis biru dengan tinggi 43 m yang terdapat pada gambar 4.6 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Medan magnet di kurva S mengalami perubahan yang fluktuatif. Nilai medan magnet awalnya turun hingga  $0,013 \text{ Vs/m}^2$  di ketinggian 13 m, lalu nilai medan magnet naik secara konstan hingga ketinggian 33 m (x) dengan nilai medan magnet  $0,257 \text{ Vs/m}^2$ . Nilai medan magnet kemudian turun kembali hingga  $0,037 \text{ Vs/m}^2$  di ketinggian 40 m dan naik kembali hingga dipuncak kurva. Puncak kurva dengan ketinggian 43 m memiliki nilai medan magnet sebesar  $0,083 \text{ Vs/m}^2$ . Nilai medan magnet tertinggi dan terendah berturut-turut adalah sebesar  $0,257 \text{ Vs/m}^2$  dan  $0,013 \text{ Vs/m}^2$ .



**Gambar 4.6** Grafik dan garis kurva S

### 4.3.3 Grafik dan Kurva T

Gambar 4.7 menunjukkan nilai medan magnet pada saluran transmisi yang berada di titik T. Garis biru dengan tinggi 27,5 m yang terdapat pada gambar 4.7 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Dapat dilihat digambar, nilai medan magnet mengalami sedikit kenaikan dari 0,06 Vs/m<sup>2</sup> berawal dari *ground* hingga mencapai ketinggian 11,5 m dengan nilai medan magnet 0,1374 Vs/m<sup>2</sup>. Nilai medan magnet kemudian naik secara konstan hingga mencapai titik tertinggi medan magnet (x) diketinggian 23 m dengan nilai medan magnet 0,626 Vs/m<sup>2</sup>. Nilai medan magnet terus menurun secara konstan setelah mencapai titik tertinggi hingga nilai medan magnet mencapai 0,14 Vs/m<sup>2</sup> diketinggian 27 m.

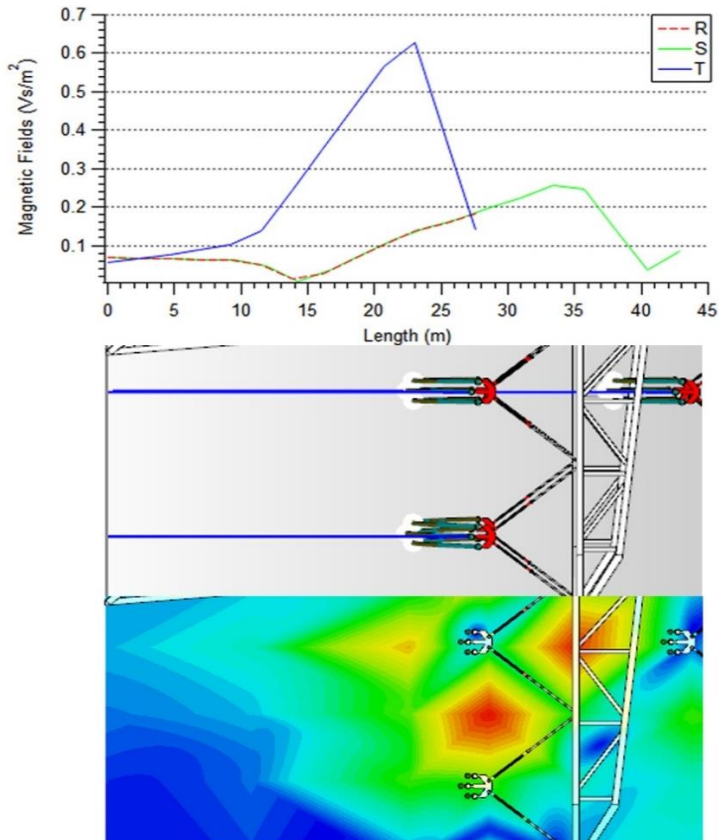




**Gambar 4.7** Grafik dan garis kurva T

#### 4.3.4 Perbandingan Grafik R, S, dan T

Penarikan garis kurva pada CST Studio Suite di ketiga fasa saluran transmisi secara menyeluruh dapat dilihat pada gambar 4.8.



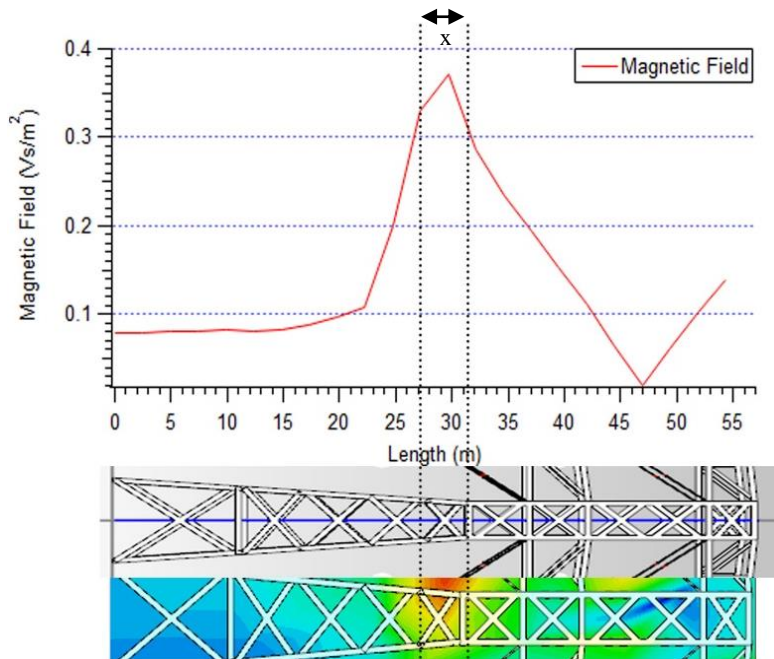
**Gambar 4.8** Perbandingan grafik R, S, dan T

Dapat dilihat digambar nilai medan magnet digrafik R dan S mulai dari *ground* hingga ketinggian 27 m dimana grafik R berhenti. Grafik R berhenti di nilai medan magnet sebesar 0,185 Vs/m<sup>2</sup>. Sedangkan grafik S terus naik nilainya hingga mencapai 0,257 Vs/m<sup>2</sup> di ketinggian 33 m.

Setelah grafik S berada di nilai medan magnet tertingginya, grafiknya turun dan naik sedikit hingga puncak. Grafik T mengalami naik turun secara konstan dan memiliki nilai medan magnet  $0,626 \text{ Vs/m}^2$  dimana nilai tersebut paling tinggi dibandingkan dengan nilai medan magnet tertinggi R dan S.

#### **4.3.5 Grafik dan Kurva Tower**

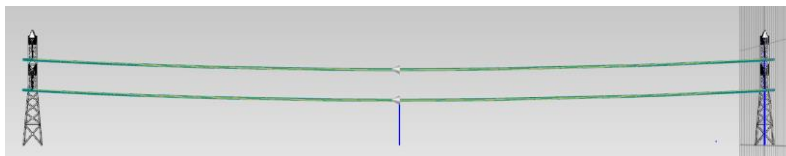
Di subbab ini akan dilakukan pengamatan dan juga Analisa hasil simulasi *lf solver* dalam *software* CST Studio Suite dengan letak kurva di badan *tower* transmisi. Garis biru dengan tinggi 54 m yang terdapat pada gambar 4.9 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Nilai medan magnet di badan *tower* transmisi tidak ada perubahan yang konstan dari *ground* hingga ketinggian 22 meter, setelah itu nilai medan magnet naik konstan hingga titik tertingginya (x) dengan nilai  $0,372 \text{ Vs/m}^2$ . Nilai medan magnet menurun hingga titik terendahnya di ketinggian 47 m dengan nilai  $0,02 \text{ Vs/m}^2$  dan kembali naik hingga  $0,14 \text{ Vs/m}^2$  di puncak kurva *tower* transmisi.



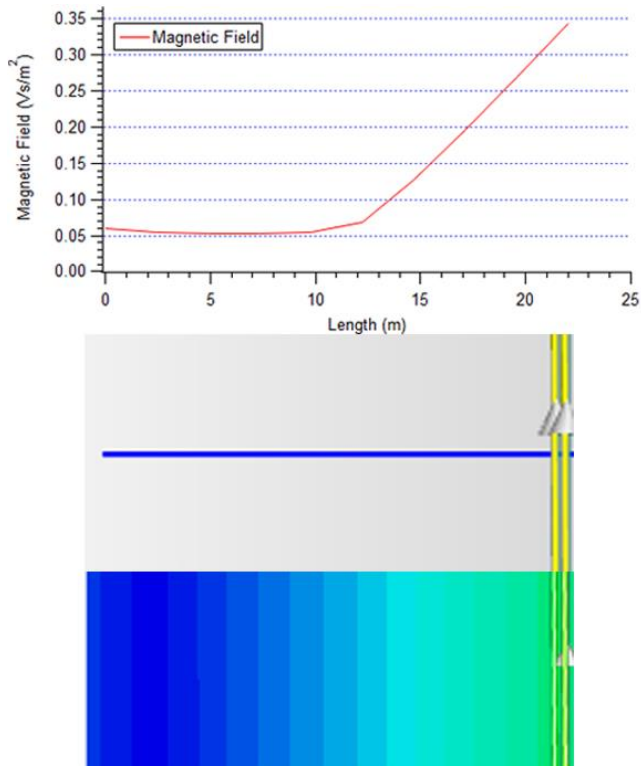
**Gambar 4.9** Grafik dan garis kurva tower

#### 4.4 Grafik dan Kurva Andongan Saluran Transmisi

Penarikan garis kurva andongan saluran transmisi dapat dilihat di gambar 4.10



**Gambar 4.10** Penarikan garis kurva andongan

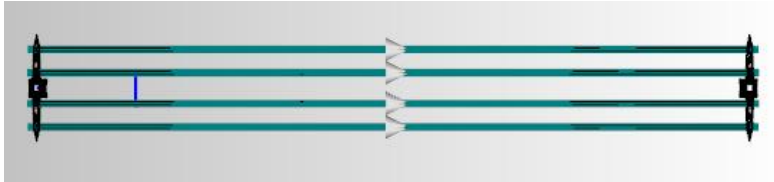


**Gambar 4.11** Grafik dan garis kurva andongan

Garis biru dengan tinggi 32 m yang terdapat pada gambar 4.11 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Nilai medan magnet di andongan saluran transmisi mengalami sedikit kenaikan dan penurunan dari *ground* hingga tinggi 12 m, tidak ada perubahan yang konstan dari *ground* hingga ketinggian 12 m, setelah itu nilai medan magnet naik konstan hingga titik tertingginya dengan nilai 0,346 Vs/m<sup>2</sup>. Nilai medan magnet tertinggi dan terendah secara berurutan adalah 0,346 Vs/m<sup>2</sup> dan 0,053 Vs/m<sup>2</sup>.

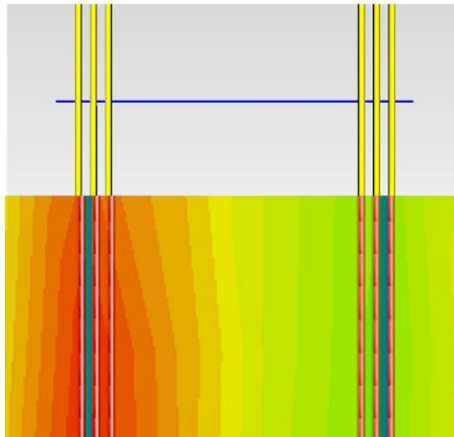
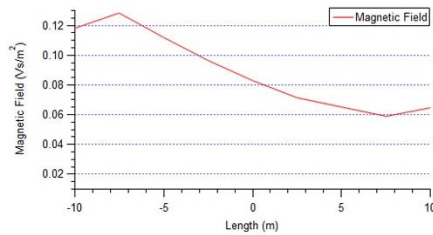
#### 4.5 Grafik dan Kurva Bawah Andongan

Penarikan garis kurva terakhir dilakukan dibawah andongan saluran transmisi. Untuk lebih jelasnya, penarikan garis kurva bawah andongan saluran transmisi dapat dilihat pada gambar 4.12



**Gambar 4.12** Garis kurva bawah andongan

Garis biru dengan lebar 20 m yang terdapat pada gambar 4.12 menunjukkan bagian yang diukur nilai medan magnetnya. Nilai medan magnet dibawah andongan saluran transmisi mengalami kenaikan secara konstan hingga meter 7 dengan nilai medan magnet sebesar  $0,084 \text{ Vs/m}^2$ , lalu nilai medan magnet sedikit menurun di meter 17 dengan nilai medan magnet sebesar  $0,062 \text{ Vs/m}^2$  dan naik kembali hingga meter 35 dengan nilai medan magnet sebesar  $0,106 \text{ Vs/m}^2$ . Nilai medan magnet turun kembali hingga ujung kurva dengan nilai  $0,014 \text{ Vs/m}^2$ . Nilai medan magnet tertinggi dan terendah secara berurutan adalah  $0,106 \text{ Vs/m}^2$  dan  $0,014 \text{ Vs/m}^2$ .



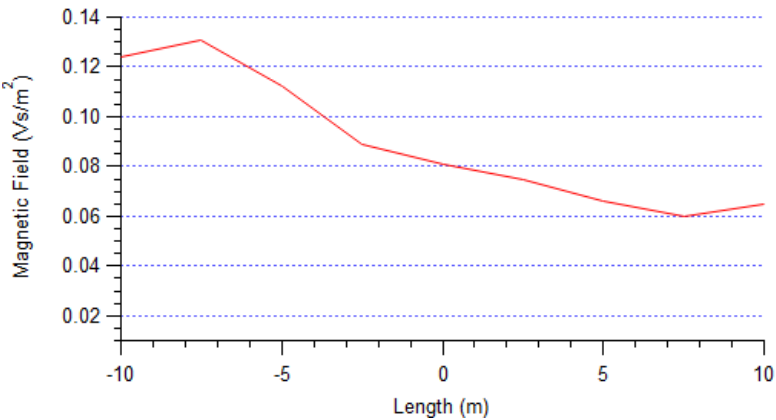
**Gambar 4.13** Grafik dan garis kurva bawah andongan

#### 4.6 Pengukuran Langsung Medan Magnet

Setelah mendapatkan hasil kurva dan grafik dari simulasi *lf solver* dalam *software* CST Studio Suite, langkah selanjutnya adalah melakukan pengukuran langsung di saluran transmisi 500 kV. Pengukuran dilakukan di saluran transmisi 500 kV krian-gresik yang berada di gresik. Pengukuran langsung dilakukan dengan menggunakan alat ukur medan magnet *ELF Field Strength Measurement System* produksi Holaday Industries Inc. dengan tipe alat ukur HI-3604.

Langkah pertama pengukuran langsung medan magnet adalah mengukur jarak dan ketinggian titik yang akan diukur. Jarak dan ketinggian pengukuran disesuaikan dengan jarak dan ketinggian yang ada di pemodelan simulasi saluran transmisi. Dalam pengukuran secara langsung, ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran diantaranya adalah suhu dan penggunaan energi listrik. Hasil

dari pengukuran langsung dapat dilihat pada tabel 4.1 dan grafik dari pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.12



**Gambar 4.14** Grafik pengukuran langsung

**Tabel 4.1** Hasil pengukuran langsung

| Jarak (m) | Nilai Medan Magnet (Vs/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|---|
| -10       | 0,124                                   |
| -7,5      | 0,131                                   |
| -5        | 0,112                                   |
| -2,5      | 0,089                                   |
| 0         | 0,081                                   |
| 2,5       | 0,075                                   |
| 5         | 0,066                                   |
| 7,5       | 0,06                                    |
| 10        | 0,065                                   |

#### 4.7 Perbandingan Pengukuran Langsung Dengan Simulasi

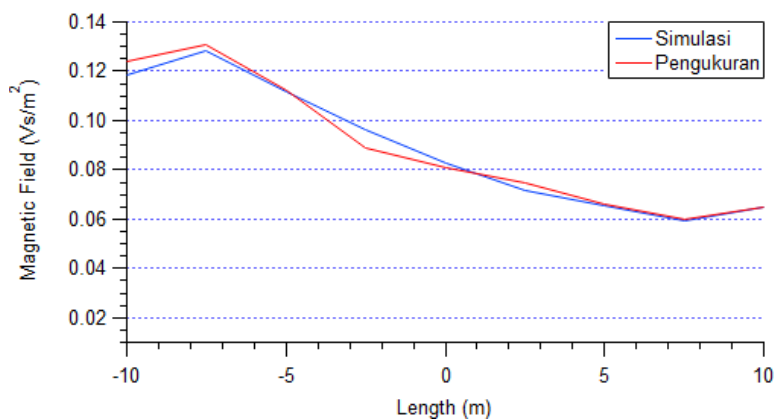
Setelah mendapatkan nilai-nilai medan magnet pada titik-titik yang sudah ditentukan dengan menggunakan simulasi *lf solver* dalam *software* CST Studio Suite dan pengukuran langsung di saluran transmisi 500 kV krian-gresik, kita dapat membandingkan nilai-nilai medan magnet tersebut menggunakan grafik. Hasil perbandingan dapat dilihat digambar 4.13 dan tabel 4.2

**Tabel 4.2** Perbandingan hasil pengukuran dengan simulasi

| Jarak (m) | Nilai Medan Magnet (Vs/m <sup>2</sup> ) |                     | Korelasi Antar Hasil (%) |
|-----------|---|---------------------|--------------------------|
|           | Simulasi                                | Pengukuran Langsung |                          |
| -10       | 0,118                                   | 0,124               | 99.09 %                  |
| -7,5      | 0,128                                   | 0,131               |                          |
| -5        | 0,111                                   | 0,112               |                          |
| -2,5      | 0,096                                   | 0,089               |                          |
| 0         | 0,082                                   | 0,081               |                          |
| 2,5       | 0,071                                   | 0,075               |                          |
| 5         | 0,065                                   | 0,066               |                          |
| 7,5       | 0,059                                   | 0,06                |                          |
| 10        | 0,064                                   | 0,065               |                          |

Dari hasil perbandingan dapat dilihat nilai pengukuran langsung dengan simulasi tidak berbeda jauh. Nilai medan magnet berada dititik tertinggi pada meter -7,5. Nilai medan magnet tertinggi pada simulasi adalah 0,128 Vs/m<sup>2</sup> dan nilai medan magnet tertinggi pada pengukuran adalah 0,131 Vs/m<sup>2</sup>. Nilai medan magnet terendah pada simulasi adalah 0,059 Vs/m<sup>2</sup> dan nilai medan magnet terendah pada pengukuran adalah 0,06 Vs/m<sup>2</sup>.





**Gambar 4.15** Grafik perbandingan medan magnet simulasi dengan pengukuran

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan analisa data, dapat diambil beberapa kesimpulan dari distribusi medan magnet pada saluran transmisi 500kV adalah sebagai berikut:

1. Pada perbandingan kondisi medan magnet saluran transmisi diketiga fasa, didapatkan hasil nilai medan magnet tertinggi terdapat pada T. Kondisi medan magnet di R dan S tidak berbeda jauh dengan hasil yang fluktuatif. Sedangkan kondisi medan magnet di T memiliki hasil naik turun secara konstan.
2. Perbandingan nilai medan magnet hasil simulasi dan pengukuran langsung pada saluran transmisi tidak berbeda jauh dengan nilai medan magnet tertinggi  $0,092 \text{ Vs/m}^2$  untuk simulasi dan  $0,095 \text{ Vs/m}^2$  untuk pengukuran langsung. Medan magnet dengan nilai tertinggi terdapat pada tengah konduktor dan nilai terendahnya terdapat pada area yang menjauhi konduktor. Nilai terendah yang didapatkan untuk simulasi dan pengukuran langsung secara berurutan adalah  $0,015 \text{ Vs/m}^2$  dan  $0,005 \text{ Vs/m}^2$ .
3. Nilai medan magnet tertinggi yang dihasilkan oleh saluran transmisi secara keseluruhan terdapat pada area konduktor yang berada di *tower* transmisi dengan nilai  $0,884 \text{ Vs/m}^2$

#### **5.2 Saran**

Saran untuk kedepannya apabila menggunakan *software* CST Studio Suite agar lebih memperhatikan dalam pembentukan element segitiga (*mesh*). Sehingga dalam melakukan perhitungan nilai medan magnet, hasil yang didapatkan bisa memuaskan dan sesuai dengan yang diharapkan. Untuk studi selanjutnya dapat dilakukan pemodelan selain untuk perhitungan distribusi medan magnet.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sharin Ab Ghani, Mohd Shahril Ahmad Khair, Imran Sutan Chairul, Musa Yusup Lada, dan Nor Hidayah Rahim, “*Study of Magnetic Fields Produced by Transmission Line Tower Using Finite Element Method (FEM)*”, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Malaysia, 2014
- [2] Hitoshi Kusuma Putra, Daniar Fahmi, dan I Made Yulistya Negara, “*Analisa Pengaruh Medan Listrik Isolator Terhadap Tower Distribusi Saat Terkena Tegangan Tinggi Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [3] Ahmad Danyalin, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, “*Analisis Distribusi Medan Listrik pada Isolator Gantung di Ketiga Fasa saat Terkena Flashover Menggunakan Simulasi Berbasis FEM*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [4] Grignion Kevin Ilham Pratama, I Made Yulistya Negara, dan Daniar Fahmi, “*Analisis Pengaruh Kontaminan Terhadap Distribusi Medan Listrik Pada Isolator Load Break Switch*”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [5] H. William, B. John, “*Elektromagnetika Edisi Ketujuh*”, Erlangga, 2006
- [6] Farzad Ebrahimi, “*Finite Element Analysis – New Trends And Development*”, InTech, Kroasia, 2012.
- [7] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, dan T. Kulworawanichpong, “*Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500 kV Power Transmission Systems*”, 2010
- [8] S. R. Azzuhri, WNL Mahadi, “*Power Transmission Line Magnetic Fields: A Survey on 120 kV Overhead Power Transmission Lines in Malaysia*”, University of Malaya, Kuala Lumpur, 1981.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT HIDUP



**Roy Fachri Irawan**, lahir di Surabaya, 25 September 1993. Penulis memulai pendidikan Sekolah Dasar di SD Khadijah II, setelah lulus pada tahun 2005 melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 3 Surabaya. Pada tahun 2008 lulus, kemudian melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 2 Surabaya dan lulus ditahun 2011 dan melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi di Surabaya. Penulis mengambil jurusan teknik elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan fokus pada riset mengenai saluran transmisi. Penulis dapat dihubungi melalui email [roy11@mhs.ee.its.ac.id](mailto:roy11@mhs.ee.its.ac.id)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*